

4.3 Onda de marea en canales y fiordos australes

Juan José Fierro

Departamento de Oceanografía. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile
E-mail: oceanografia@shoa.cl

La onda de marea oceánica de carácter semidiurno es modificada en la plataforma continental por condiciones de aguas someras, proceso que se intensifica en las proximidades de la costa debido a las menores profundidades sobre las que se propaga y a la fricción por efectos no lineales (Pugh, 2004). Diversos investigadores han determinado que en el ambiente costero, los efectos no lineales generan armónicos de marea en aguas someras (Le Provost, 1991; Parker, 1991), conocidos como sub-armónicos y compuestos de los principales constituyentes astronómicos (Lessa, 1996). Estos nuevos armónicos tienen frecuencias mayores que las de los constituyentes principales de los cuales derivan. En ambientes someros y en particular al interior de zonas estuarinas, el espectro de energía del nivel del mar es diferente al obtenido en sectores oceánicos, debido a la alteración y deformación de la onda de marea a medida que se propaga en aguas menor profundidad, donde los armónicos de aguas someras se utilizan para representar y cuantificar la distorsión de la onda de marea.

En general, se considera que la onda de marea en estuarios recibe su energía directamente del océano exterior, siendo de menor importancia el efecto generador de marea que ejerce el Sol y la Luna en aguas interiores, al considerar el menor volumen de agua estuarina con relación al del océano. A su vez, la onda de marea se propaga con una velocidad directamente proporcional a la profundidad sobre la cual se desplaza, relación que experimenta ligeras modificaciones en ambientes someros, donde la amplitud de la onda es comparable a dicha profundidad. Asimismo, las cuencas interiores tienen su propio modo natural de oscilación que depende de sus dimensiones. Este aspecto es de particular importancia en estuarios que se caracterizan por una gran variabilidad en su geometría. En este contexto, los límites del estuario

impiden que la onda de marea se propague indefinidamente como una onda progresiva, experimentando una reflexión frente a cambios repentinos en la profundidad y en los bordes del estuario, donde las ondas incidente y reflejada se combinan para generar la onda total. En un canal cerrado en su extremo, como es el caso de numerosos fiordos australes, la onda reflejada sin pérdida de amplitud produce un patrón de ondas estacionarias, donde los nodos y antinodos tienen relación directa con la intensidad de la corriente generada (Pugh, 1987). Sin embargo, muchos estuarios experimentan disipación de la energía de marea, antes y después de la reflexión, obteniéndose una onda estacionaria con una contribución progresiva de magnitud variable (Dyer, 1997).

El desarrollo del programa CIMAR ha permitido la realización de investigaciones en la región de canales y fiordos australes chilenos, aumentando el conocimiento de las características de la onda de marea debido a la acción de los mecanismos mencionados anteriormente. En la zona Puerto Montt a laguna San Rafael (Zona Norte), se instalaron sondas medidoras de nivel del mar preferentemente en el canal Moraleda, en las inmediaciones de la constricción de Meninea y, posteriormente, en los canales Costa y Darwin (Fig. 1). En la zona golfo de Penas a estrecho de Magallanes (Zona Central), las sondas se instalaron en los canales Wide y Concepción (Fig. 1), mientras que en la zona estrecho de Magallanes a cabo de Hornos (Zona Sur) se instalaron sondas en punta Delgada y banco Dirección (Fig. 1), para analizar la propagación de las ondas de marea provenientes de los océanos Atlántico (boca oriental) y Pacífico (boca occidental) (Salinas *et al.*, 2004).

La onda de marea, que recorre de norte a sur las aguas exteriores a los canales australes chilenos, tiene rangos moderados, donde a modo

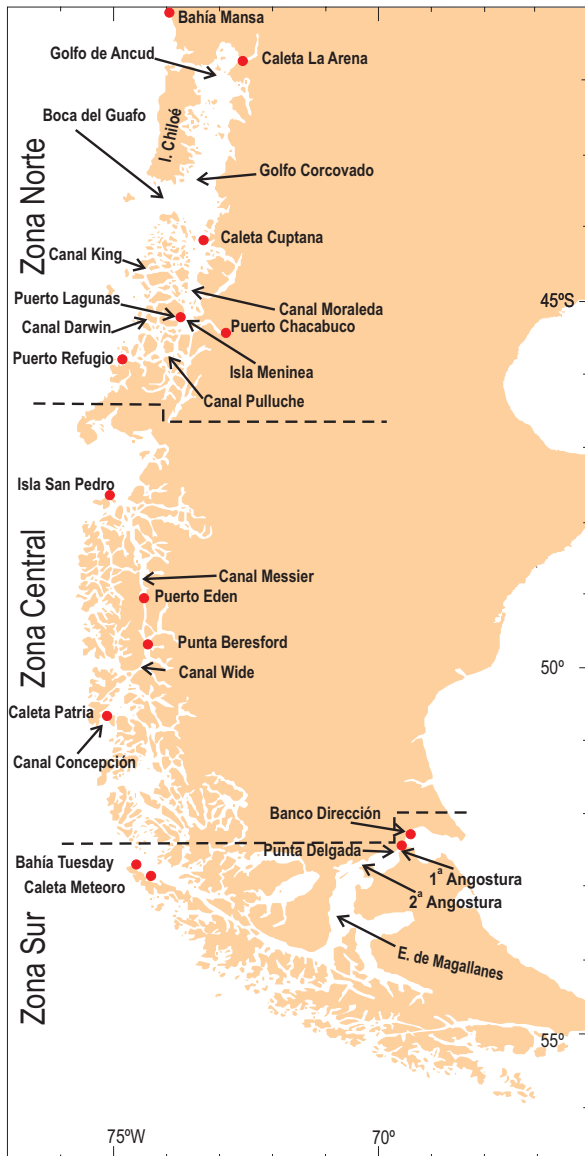


Figura 1: Posición geográfica de las estaciones de medición de mareas.

de ejemplo, en sicigia se han medido rangos de 1,62 m en bahía Mansa ($40^{\circ} 33' S$, $73^{\circ} 46' W$) y 1,50 m en puerto Refugio ($45^{\circ} 52' S$, $74^{\circ} 48' W$); y de 1,58 m en la isla San Pedro ($47^{\circ} 43' S$, $74^{\circ} 53' W$). En el caso del estrecho de Magallanes la situación es diferente, ya que la boca occidental tiene un rango de marea de 1,80 m en bahía Tuesday ($52^{\circ} 50' S$, $74^{\circ} 29' W$) y en la boca oriental un rango de 10,37 m en banco Dirección ($52^{\circ} 25' S$, $69^{\circ} 30' W$; Fig. 1). Esto demuestra las diferentes características que tiene la onda de ma-

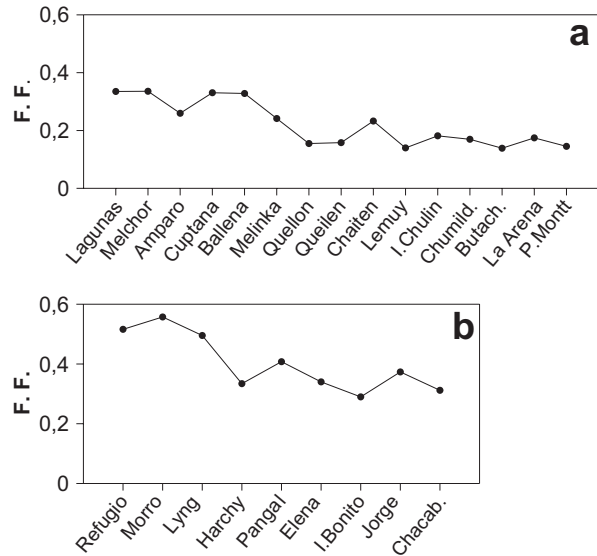


Figura 2: Factor de Forma (F.F.) en perfiles a) longitudinales y b) transversales en canales y fiordos de la zona norte.

rea en ambas bocas del estrecho, donde la marea oceánica es fuertemente distorsionada sobre la plataforma continental del océano Atlántico.

En aguas interiores los rangos de marea experimentan modificaciones con respecto al sector exterior, así por ejemplo en la Zona Norte, se obtuvo durante la sicigia un aumento de altura de marea significativo al norte de la boca del Guafo, con un rango de 6,79 m en caleta La Arena ($41^{\circ} 41' S$, $72^{\circ} 39' W$); mientras que al sur de la boca del Guafo el rango fue menor con 3,12 m en caleta Cuptana ($44^{\circ} 39' S$, $73^{\circ} 36' W$), en el canal Moraleda. Al sur de la constricción-umbral de Meninea, se determinó un rango de 2,50 m en puerto Lagunas ($45^{\circ} 17' S$, $73^{\circ} 43' W$; Fig. 1).

En la Zona Central se determinó un rango de marea de 1,66 m en punta Beresford ($49^{\circ} 47' S$, $74^{\circ} 22' W$), que aumentó a 2,05 m en puerto Edén ($49^{\circ} 08' S$, $74^{\circ} 27' W$). Mientras que en la Zona Sur se observó una mayor variabilidad en el rango de marea. Ello es consecuencia de las diferentes características que presentan las ondas del Pacífico y Atlántico, donde se destaca el rango de 2,10 m en caleta Meteoró ($52^{\circ} 58' S$, $70^{\circ} 04' W$), valor que se incrementó en los sectores de Primera y Segunda Angostura, con un máximo de 8,90 m en punta Delgada ($52^{\circ} 28' S$, $69^{\circ} 32' W$; Fig. 1).

La onda de marea a lo largo del litoral chileno, presenta un régimen mixto preferentemente semidiurno (Fierro, 2001). Una caracterización inicial de la marea exterior a las zonas estuarinas en estudio, se obtuvo empleando un Factor de Forma conocido como coeficiente de Courtier, sobre la base de la razón de amplitud entre los principales constituyentes armónicos diurnos y semidiurnos (Pugh, 2004). Este parámetro tiene un valor de 0,52 en el sector de puerto Refugio (Zona Norte) y 0,54 en el sector de isla San Pedro (Zona Central), característicos de ondas de mareas del tipo mixta-semidiurna (Fig.2). Un valor similar se obtuvo para la Zona Sur, en la boca occidental del estrecho de Magallanes, con un factor de 0,58 en caleta Meteoro. Destaca el factor de 0,14 que se determinó en punta Delgada, en la boca oriental del estrecho de Magallanes, característico de una onda de marea de tipo semidiurno, que demuestra las diferentes características que tiene esta onda en ambas bocas del estrecho.

En localidades situadas en el canal Moraleda (Zona Norte), este parámetro disminuye a valores del orden de 0,25 (Fierro *et al.*, 2000), reflejando la disminución en la desigual-

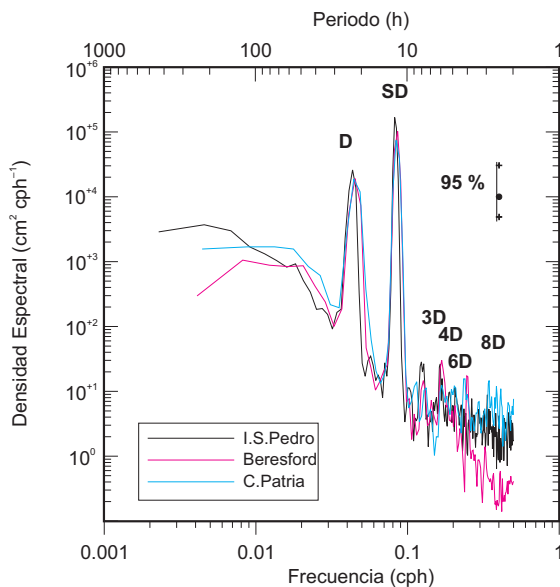


Figura 3: Estimación de densidad espectral en la sección longitudinal desde isla San Pedro a caleta Patria.

dad diurna de la marea. En cambio, en los canales Messier y Wide (Zona Central) se mantienen los valores oceánicos, aumentando levemente a 0,65 en la boca sur del canal Concepción (caleta Patria) (Fierro *et al.*, 2003). En la figura 2 se aprecia la modificación, expresada en términos del Factor de Forma, que en la Zona Norte experimenta la onda de marea exterior durante su propagación en los canales longitudinales interiores ubicados de norte a sur, donde en el seno Reloncaví, y en los golfos Ancud y Corcovado la marea es semidiurna, mientras que en aguas interiores al sur de la boca del Guafo, ésta se transforma en mixta semidiurna. Además, al examinar la propagación transversal de la onda de marea desde el sector exterior (Puerto Refugio) hasta la cabeza del fiordo Aysén (Puerto Chacabuco), se aprecia la mayor importancia relativa que tienen los componentes semidiurnos de la marea en los canales y fiordos interiores.

El análisis espectral de las series horarias de nivel del mar, muestra claramente que la marea es el fenómeno que se presenta con mayor energía en el nivel del mar, donde en diferentes localidades ubicadas en aguas interiores de la región austral, destacan los máximos de energía en las bandas diurna (D) y semidiurna (SD). Asimismo, la disminución de energía en alta frecuencia refleja la distorsión menor que experimenta la onda de marea por efectos friccionales. En la figura 3 se muestra la estimación espectral para sectores seleccionados entre la boca norte del canal Messier y la boca sur del canal Concepción, destacando los máximos de energía mencionados, en frecuencias de 0,08105 cph (12,3 h) y 0,040245 cph (24,8 h).

Los resultados obtenidos permiten determinar la importancia de la boca del Guafo como vía de acceso para la penetración de la onda de marea proveniente del océano Pacífico. Esta onda se propaga posteriormente hacia el sur, a través del canal Moraleda (Fierro *et al.*, 2000), y hacia el norte, en aguas interiores de la isla de Chiloé. Es preciso agregar, que canales transversales de importancia, como los canales Tuamapu, King, Darwin y Pulluche, también constituyen vías importantes para la propagación de la onda de marea.

Los estudios efectuados en la Zona Sur permitieron determinar la gran variabilidad de rangos de marea que existe a lo largo del estrecho de Magallanes, al igual que la variación en la velocidad de propagación de la onda de acuerdo a los accidentes geográficos que ésta encuentra, ocurriendo las mayores velocidades en el sector medio. A su vez, la onda de marea de carácter semidiurno, experimentó su mayor atenuación en el sector oriental del estrecho, entre la Primera y Segunda Angostura. También, resulta interesante destacar la identificación de una onda de baja frecuencia, con período de 6 a 10 días, que se propaga de occidente a oriente distorsionando la onda de marea proveniente del océano Atlántico.

Referencias

- Dyer, K. 1997. Estuaries. A physical introduction. J. Wiley & Sons, Chichester, 195 pp.
- Fierro, J. 2001. Tides in the Chilean coast. *Hydro International*, 5(1): 7-9.
- 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.
- Fierro, J., M. Castillo & C. Valenzuela. 2003. Propagación de la onda de marea en canales adyacentes a Campos de Hielo Sur. *Cienc. Tecnol. Mar*, 26 (1): 5-14.
- Le Provost, C. 1991. Generation of overtides and compound tides (Review). En: B.B. Parker (ed.). *Tidal hydrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, pp. 269-295.
- Lessa, G. 1996. Tidal dynamics and sediment transport in a shallow macrotidal estuary. En: Pattiaratchi (ed.). *Mixing in estuaries and coastal seas*. *Coast. Estuar. Stud.*, 50, American Geophysical Union, pp. 338-360.
- Parker, B. B. 1991. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (Review). En: B.B. Parker (ed.). *Tidal hydrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, pp. 237-268.
- Pugh, D. 1987. *Tides, surges and mean sea level*. John Wiley & Sons, London, 472 pp.
- Pugh, D. 2004. *Changing sea levels*. Cambridge University Press, Cambridge, 265 pp.
- Salinas, S., M. Contreras & J. Fierro. 2004. Propagación de la onda de marea en el estrecho de Magallanes. *Cienc. Tecnol. Mar*, 27(2): 5-20.