

UN MODELO HIDRODINÁMICO-BAROTRÓPICO PARA LOS FIORDOS AUSTRALES DE CHILE ENTRE LOS 41° S Y LOS 46° S*

A HYDRODYNAMIC-BAROTROPIC MODEL FOR THE
AUSTRAL FJORDS IN CHILE BETWEEN 41° S AND 46° S

VÍCTOR H. MARÍN¹
FRANCISCO J. CAMPUZANO²

¹Laboratorio de Modelación Ecológica,
Departamento de Ciencias Ecológicas,
Facultad de Ciencias, Universidad de Chile;
Casilla 653, Santiago, Chile.

²Instituto Superior Técnico,
Pavilhão de Mecânica I, 1º,
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa,
E-mail: vmarin@antar.uchile.cl

Recepción: junio de 2006 – Versión corregida aceptada: julio de 2008

RESUMEN

La modelación de los ecosistemas estuarino-costeros característicos de la región de los fiordos australes de Chile debería realizarse teniendo como base modelos hidrodinámicos que den cuenta de la circulación y sus principales forzantes. En este trabajo presentamos un modelo barotrópico, forzado por la marea (FIORDOS_NIVEL1), para la zona comprendida entre los 41° S y los 46° S, generado por medio del sistema numérico MOHID. FIORDOS_NIVEL1 puede ser usado como base para la generación de modelos anidados de menor dimensión y mayor resolución en ámbitos diversos como estudios de calidad de agua o simulaciones ecosistémicas.

Palabras claves: Modelo numérico, circulación, fiordos, MOHID.

ABSTRACT

Modelling coastal-estuarine ecosystems, characteristic of the southern fjords of Chile, should be based on hydrodynamic models accounting for the water circulation and its forcing. In this work we describe a barotropic, tidally forced, model (FIORDOS_NIVEL1) for the region between 41° S and 46° S, based on the MOHID modelling system. FIORDOS_NIVEL1 can be used as the basis of nested, smaller dimension and higher resolution, models for a variety of studies such as water quality and ecosystem simulations.

Key words: Numerical model, circulation, fjords, MOHID.

* Proyecto CONA-C9F 03-06.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de modelos cuantitativos es importante en la mayoría de las ciencias naturales. Estos pueden ir desde simples modelos empíricos (Marín *et al.*, 2003) hasta modelos analíticos (Caswell, 2001) y numéricos (Heaps, 1987). Los modelos pueden servir a una variedad de objetivos tales como: síntesis del conocimiento sobre el sistema bajo estudio; hacer evidentes y explícitas las falencias en dicho conocimiento; como plataformas conceptuales para poner a prueba hipótesis sobre la dinámica de los sistemas y como herramientas de predicción y construcción de escenarios de desarrollo futuro (Canham *et al.*, 2003; Meadows *et al.*, 2004). En el caso de la oceanografía en general, y la oceanografía costera en lo particular, existe una larga tradición en la generación y uso de modelos numéricos (Nihoul, 1975; Bowden, 1983; Heaps, 1987; Dyke, 1996). Sin embargo, modelos acoplados físico-ecológicos y físico-ecológico-sociales son más recientes (Salomons *et al.*, 1999; Peng *et al.*, 2002; Arrequin-Sanchez *et al.*, 2004; Fennel & Neumann, 2004). Estos últimos son necesarios para generar predicciones respecto de los efectos potenciales de las sociedades humanas en los ecosistemas costeros, para poner a prueba hipótesis respecto de mecanismos de funcionamiento de estos ecosistemas y para realizar simulaciones respecto de acciones de manejo. Lo anterior es especialmente válido bajo el esquema del manejo integrado de zonas costeras o en la elaboración de normas secundarias sobre la calidad de las aguas marinas (Salomons *et al.*, 1999).

El proyecto ECOManage, financiado por la Unión Europea¹ y desarrollado en Chile por la Universidad de Chile² y el Centro de Ecología Aplicada, tuvo como objetivo principal ampliar la capacidad de los manejadores de recursos para el uso de un sistema integral de conocimiento basado en la implementación de modelos numéricos de ecosistemas costeros. El proyecto se desarrolló en tres áreas geográficas de Latinoamérica: (1) el Estuario Santos en Brasil, (2) Bahía Blanca en Argentina y (3) el Fiordo Aysén en Chile. La zona de los fiordos australes de Chile es por estos días escenario de un acelerado pro-

ceso de inversiones y proyectos de desarrollo (e.g. salmonicultura, centrales hidroeléctricas) los cuales pueden generar modificaciones tanto en la calidad del agua como en la ecología de los fiordos. Sin embargo, aún cuando se han desarrollado modelos numéricos sobre la Corriente de Humboldt (Batten *et al.*, 1995; Marín, 1997; Escribano *et al.*, 2004; Palma *et al.*, 2006), no existe un modelo numérico de la circulación para la zona de los fiordos. ECO-Manager ha generado una serie de modelos anidados de circulación, con el propósito de analizar procesos ecológicos e influencias antropogénicas en el interior del Fiordo Aysén y Bahía Chacabuco. La circulación es modelada por medio de tres modelos anidados. El de mayor dimensión (FIORDOS_NIVEL1) es un modelo barotrópico forzado por la marea y que abarca la zona comprendida entre los 41°S y los 46°S y entre la costa y los 76,5° W. El principal objetivo de este trabajo es describir este modelo con el propósito de ponerlo a disposición de la comunidad científica como plataforma para estudios y desarrollo de otros modelos en zonas al interior de sus límites.

MÉTODOS

1. El sistema de modelación MOHID

MOHID³ es un sistema numérico para la modelación tridimensional de ecosistemas acuáticos. Es desarrollado y mantenido por el Centro de Investigaciones Marinas y de Tecnología Ambiental (MARETEC) del Instituto Superior Técnico perteneciente a la Universidad Técnica de Lisboa en Portugal. El sistema está compuesto de herramientas de pre-procesamiento (e.g. MOHID GIS), de una interfase gráfica para la implementación de los modelos (MOHID GUI) y de herramientas para el post-procesamiento de los resultados (e.g. MOHID GIS, MOHID POST, MOHID Time Series Editor y MOHID Statistical Analyzer). Desde el punto de vista de la modelación de ecosistemas marinos, MOHID está compuesto por más de 40 módulos los cuales interactúan y se acoplan para el desarrollo de modelos en un vasto campo de aplicaciones. El sistema puede ser instalado en un Laptop PC con un procesador de 1,5 GHz y una memoria RAM de 1 Gbyte o

¹<http://www.ecomanage.info>

²<http://antar.uchile.cl>

³<http://www.mohid.com>

más. Sin embargo, modelos anidados, especialmente aquellos que requieren un modelo de NIVEL1 extenso (ver más abajo), deberían ejecutarse en estaciones de trabajo. En el caso del Laboratorio de Modelación Ecológica, MOHID corre en una estación de trabajo DELL Precision 670 con dos procesadores Intel Xeon de 3,6 GHz y con 2 Gbyte de memoria RAM. MOHID, como sistema informático, es de libre acceso (freeware) y de código abierto.

El módulo hidrodinámico de MOHID, corresponde a un modelo baroclínico 3D, implementado en volúmenes finitos (Martins *et al.*, 2001), que resuelve las ecuaciones primitivas incompresibles, suponiendo equilibrio hidrostático y empleando la aproximación de Boussinesq. La viscosidad vertical es calculada por medio del modelo General Ocean Turbulence Model (GOTM⁴). Una descripción más detallada del módulo hidrodinámico se puede encontrar en Martins *et al.* (2001), Coelho *et al.* (2002) y en los manuales disponibles en el portal Internet de MOHID (<http://www.mohid.com>).

MOHID permite la modelación de áreas costeras y estuarinas de compleja batimetría y topografía, a través del anidamiento de una vía (Braunswieg *et al.*, 2004). Este anidamiento implica que para cada nivel, la solución de referencia para las condiciones de borde abierto corresponde al nivel jerárquico superior. MOHID, desde la perspectiva de su desarrollo como software, no tiene limitaciones respecto de los niveles de anidamiento siendo solo limitado por la memoria RAM y la velocidad del procesador. Sin embargo, la experiencia muestra que para la mayoría de las aplicaciones tres niveles de anidamiento son suficientes. Para los propósitos de la modelación de los fiordos australes hemos implementado un sistema de tres niveles. El primer nivel, FIORDOS_NIVEL1, corresponde a una solución barotrópica 2D de la corriente de marea para la zona comprendida entre los 41° S y los 46° S. Al interior de este nivel se han implementado en orden jerárquico descendiente otros dos modelos: un modelo 3D baroclínico para el Fiordo Aysén

(AYSÉN_NIVEL2) y un modelo más detallado (3D, baroclínico) para la Bahía de Chacabuco (CHACABUCO_NIVEL3) al interior del fiordo. Este trabajo solo se concentra en el primer nivel.

2. Implementación del modelo FIORDOS_NIVEL1

Batimetría

La batimetría, especialmente para zonas de geografía compleja como los fiordos australes, es una variable importante en modelos numéricos de circulación. La batimetría del modelo FIORDOS_NIVEL1 se generó a partir de tres fuentes principales: (a) cartas náuticas provenientes del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, (b) la base de datos geofísicos GEODAS (GEOphysical Data System; NOAA's National Geophysical Data Center) y la base de datos GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans; IOC, IHO and BODC, 2003). En el primer caso, se digitalizó la información proveniente de las cartas náuticas disponibles para zona de estudio por medio de ARCVIEW GIS 3.3 (Fig.1). Por otra parte, la base de datos GEODAS contiene información batimétrica, sísmica, magnética y de gravedad proveniente de los bitácoras de navegación de cruceros marinos desde 1953 a la fecha (GEODAS, 2006). La distribución espacial de los datos GEODAS usados en el modelo se muestra en la Figura 2. Por último, la base de datos GEBCO consiste en una colección de datos batimétricos que cubre todo el planeta con una resolución de un minuto. La principal ventaja de esta base de datos es su amplia cobertura, sin embargo presenta el inconveniente que en zonas someras cercanas a la costa, estos datos no son fiables, por lo que las otras dos fuentes de datos complementan perfectamente a esta última. A partir de este conjunto de datos se generó, por medio del programa MOHID GIS, la grilla numérica de batimetría. La resolución espacial para el modelo FIORDOS_NIVEL1 es de 0,02° x 0,02° (2,2 km aprox.) lo que genera una grilla de 282 x 212 elementos (Fig. 3).

⁴<http://www.gotm.net>

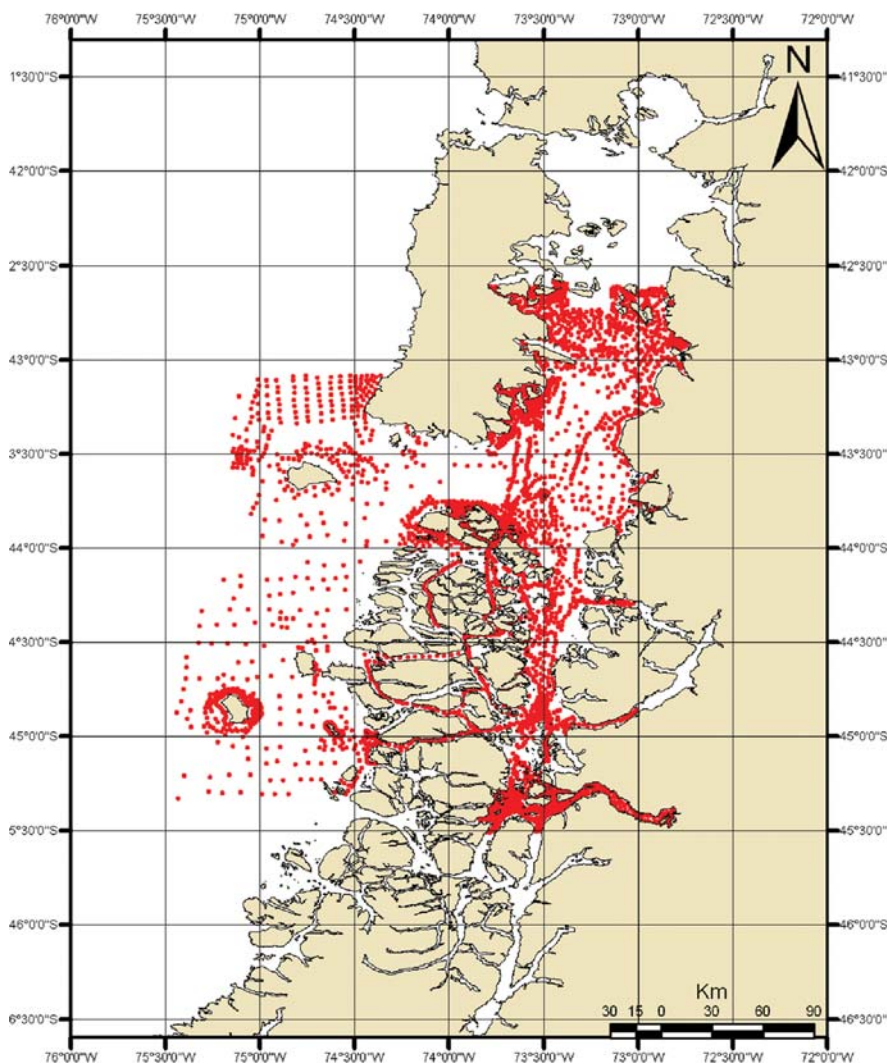


Fig. 1: Cobertura de puntos de batimetría digitalizados a partir de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

Fig. 1: Bathymetric point coverage digitized from the nautical charts of the Hydrographic and Oceanographic Service of the Chilean Navy.

Condiciones de borde para la frontera oceánica

Los principales forzantes de la circulación superficial en la zona de fiordos son las corrientes de marea y las descargas de agua dulce desde las cuencas hidrográficas (Salinas & Hormazábal, 2004). El modelo FIORDOS_NIVEL1 es forzado en su frontera oceánica por la marea, incluyendo la condición de radiación descrita por Blumberg & Kantha (1985). Los componentes de la marea son generados a partir del modelo global

FES2004, que corresponde a una versión actualizada del FES95.2 (Le Provost *et al.*, 1998). Los componentes son impuestos en estaciones ubicadas en la frontera oceánica a partir de las cuales MOHID genera las triangulaciones para imponer la marea en cada una de las celdas (Fig. 3).

Datos usados para la validación del modelo

El modelo FIORDOS_NIVEL1 fue validado para los niveles de marea respecto de estaciones disponibles entre los 41° S y los 46° S.

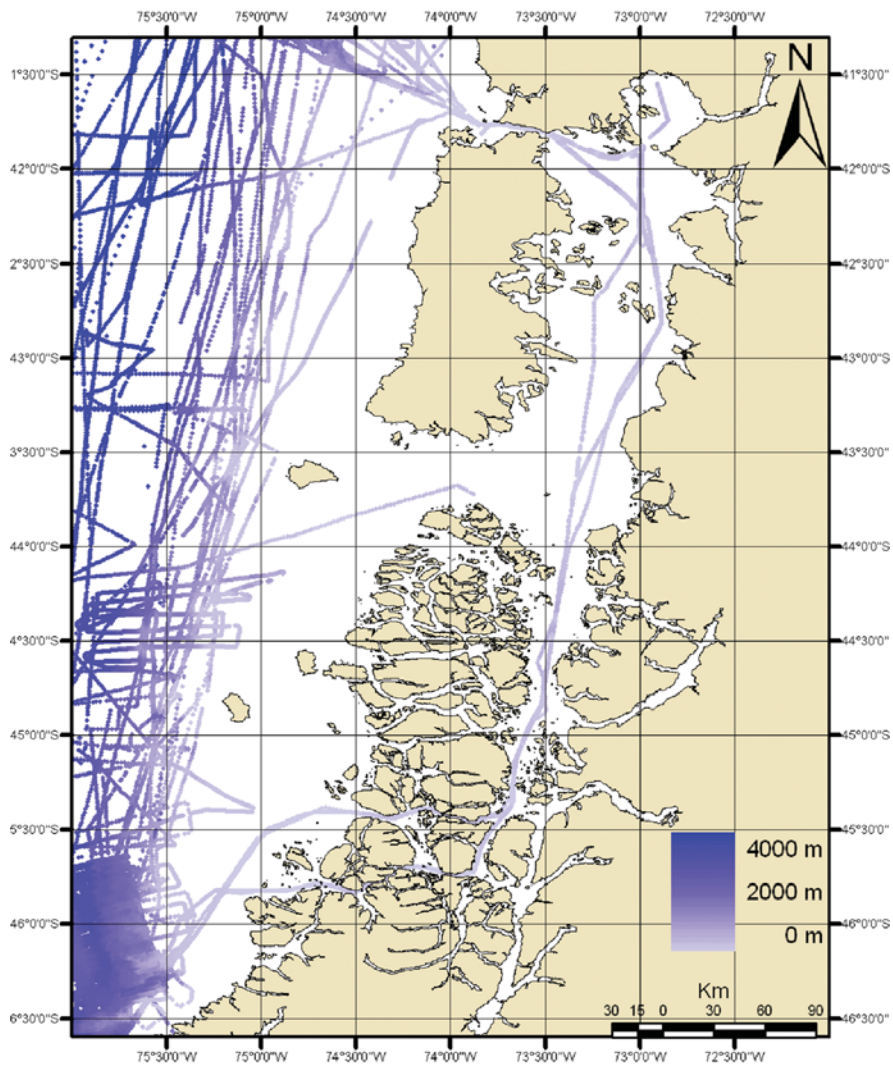


Fig. 2: Batimetría GEODAS disponible para el área del modelo FIORDOS_NIVEL1 (GEODAS, 2006).
 Fig. 2: Available GEODAS bathymetry for the FIORDOS_NIVEL 1 model (GEODAS, 2006).

Se tuvo acceso a dos tipos de datos: (1) estaciones mareográficas permanentes, a cargo del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile y (2) mediciones de corto período y alta resolución temporal (10 minutos) realizadas durante el crucero CIMAR 4 Fiordos. La Tabla I muestra el nombre, la localización y el período de observaciones para las estaciones de marea. Para el caso de las estaciones permanentes del SHOA, se tuvo acceso a datos horarios para los años 2003 y 2004. La Figura 3 muestra la ubicación de las principales estaciones mareográficas.

RESULTADOS

El análisis de los valores de la altura de la marea para las distintas estaciones control mostró que el modelo FIORDOS_NIVEL1 captura de buena forma las fluctuaciones del nivel del mar en la zona de estudios. La Figura 4 muestra un ejemplo de la relación entre los datos de cuatro estaciones mareográficas (valores obtenidos a partir de las componentes de marea por análisis armónico realizado con el software TASK-2000 POL/PSMSL Tidal Analysis Software Kit 2000; Bell *et al*, 1999)

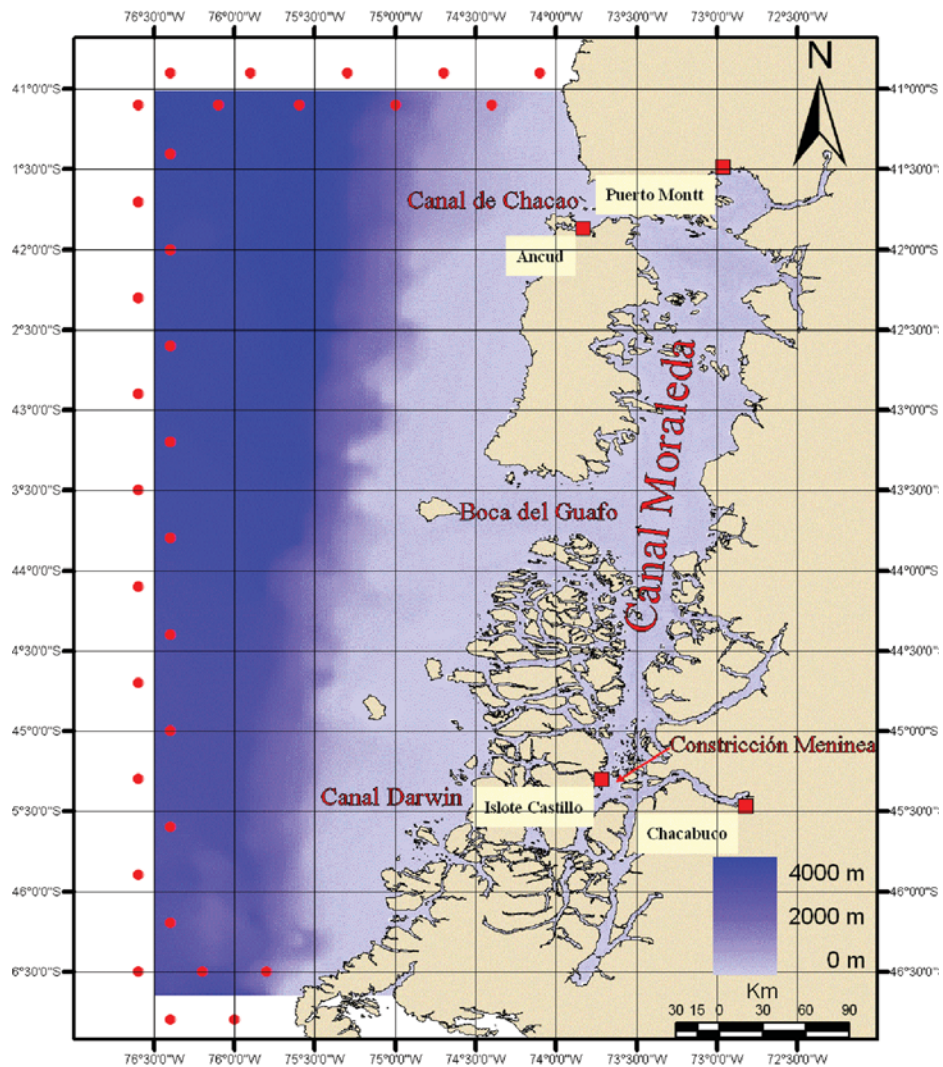


Fig. 3: Posición de las estaciones donde se genera el forzamiento de la marea en el borde oceánico (cuadrados rojos) sobre la batimetría final del modelo FIORDOS_NIVEL 1 (resolución espacial de $0,02^\circ \times 0,02^\circ$). En cada estación se impone la solución del modelo de mareas FES2004. La señal de marea para cada grilla de la frontera se genera por medio de la triangulación de las señales en las estaciones de marea. Los puntos geográficos identificados con nombres corresponden a las principales estaciones mareográficas usadas para validar los resultados de nivel del mar del modelo FIORDOS_NIVEL1.

Fig. 3: Position of the stations where the tidal forcing is generated in the oceanic boundary (red squares) superimposed to the final bathymetry of the FIORDOS_NIVEL 1 model (spatial resolution $0.02^\circ \times 0.02^\circ$). The solution of the FES2004 tidal model is imposed in each station. The tidal signal for each boundary grid is generated triangulating the signal from all stations. Geographic names identified by names correspond to the main tide-gauge stations used to validate the sea level results from the FIORDOS_NIVEL 1 model.

Tabla I. Nombre, localización geográfica y período considerado de las estaciones mareográficas usadas para la validación de los niveles de marea generados por el modelo FIRDOS_NIVEL1.

Table I. Name, geographic location and time period for the tide-gauge stations used in the validation of the sea levels generated by the FIRDOS_NIVEL 1 model.

Estación	Latitud	Longitud	Tipo de estación	Periodo considerado
Ancud (AN)	41° 52' 06" S	73° 49' 53" W	SHOA	2003-2004
P. Montt (PM)	41° 29' 05" S	72° 57' 39" W	SHOA	2003-2004
Chacabuco (CH)	45° 28' 06" S	72° 49' 09" W	SHOA	2003-2004
P. Cuptana (PC)	44° 39' 50" S	73° 37' 33" W	CF 4	Oct.'98-Feb. '99
I. Isquiliac (II)	45° 24' 35" S	74° 17' 14" W	CF 4	Oct.'98-Feb. '99
I. Castillo (CI)	45° 18' 17" S	73° 42' 53" W	CF 4	Oct.'98-Feb. '99
C. Tronador (CT)	45° 31' 30" S	73° 34' 30" W	CF 4	Oct.'98-Feb. '99

CF = Crucero CIMAR FIRDOS

y los predichos por el modelo. La bondad del ajuste, expresada en términos del coeficiente de determinación (r^2) fluctuó entre un mínimo de 0,92 para Ancud y un máximo de 0,99 para Puerto Cuptana. De especial interés, para los propósitos de desarrollo de modelos anidados de menor escala, resulta el buen ajuste ($r^2= 0,94$) logrado entre la altura de marea del modelo y los valores medidos en Bahía Chacabuco al interior del Fiordo Aysén (Fig. 3). La condición interna de esta Bahía unido al hecho que está localizada al Sur-Oeste de la Constricción de Meninea (la principal restricción topográfica del Canal Moraleda) sirve como una buena indicación para el uso del modelo FIRDOS_NIVEL1 como base para futuros modelos anidados.

La dinámica de la marea en la zona se puede apreciar gráficamente en la Figura 5. Esta corresponde a seis imágenes (cada 2 horas) del modelo correspondiente a 12 horas para la condición de sicigia. La onda de marea aún cuando ingresa a los fiordos a través de todos los canales que se comunican con el océano, lo hace preferentemente por la Boca del Guafo desviándose principalmente hacia el Norte. Ello, unido al ingreso de la onda a través del Canal de Chacao, genera las altas mareas observadas en la zona de Puerto Montt. Durante el proceso, la onda viaja hacia el sur a través del Canal de Moraleda y a pesar de que gran parte del agua abandona el sistema por la boca del Guafo, una parte viaja hacia el sur uniéndose

al agua que ingresa a través de los canales que conectan el Canal Moraleda con el Océano Pacífico. Como resultado se obtiene una intensificación de la señal de marea en el extremo sur del canal (imágenes 5 y 6, Figura 5). Las mayores velocidades encontradas en FIRDOS_NIVEL1 se presentan en la zona del Canal de Chacao. Concordante con las observaciones realizadas por Salinas & Hormazabal (2004), las corrientes meridionales en el Canal Moraleda son débiles, produciéndose además una clara división del Canal Moraleda al Norte y al Sur de la Constricción de Meninea. Finalmente, nuestra principal área de estudio (el Fiordo Aysén) recibe una marea mixta que es consecuencia del ingreso de la onda directamente desde el océano abierto a través, preferentemente, del Canal Darwin así como los reflejos de la onda a ambos extremos del Canal Moraleda. En este último, las mayores velocidades se presentan en la Constricción de Meninea (imágenes 1, 3, y 6, Figura 5).

DISCUSIÓN

La modelación numérica es una herramienta importante para el análisis cuantitativo de sistemas complejos. Para el caso de sistemas naturales (eco-sociales) esta herramienta es una de las pocas disponibles para la generación de escenarios de desarrollo y para el diseño de experimentos a escala sistémica. El Modelo MOHID ha sido utilizado en numerosos

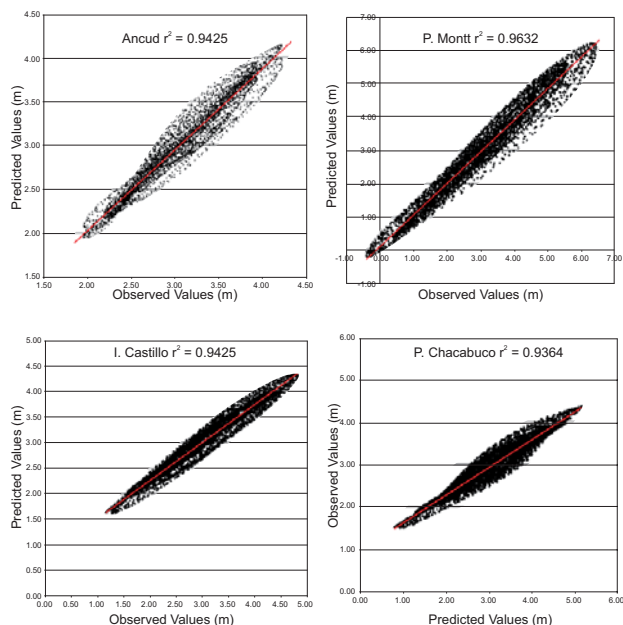


Fig. 4: Relación entre los valores observados del nivel del mar con relación a los predichos por el modelo FIORDOS_NIVEL1 para las cuatro principales estaciones mareográficas.

Fig. 4: Relationships between observed sea level values and those predicted by the FIORDOS_NIVEL 1 model for the four main tide-gauge stations.

estudios integrando una amplia variedad de procesos y escalas. El modelo MOHID ha sido aplicado satisfactoriamente en varios estuarios (Sado (Martins *et al.*, 2001); Tajo (Leitão, 2003; Braunschweig *et al.*, 2003); Scheldt (Campuzano *et al.*, 2004)) y áreas costeras (Ría de Pontevedra (Villarreal *et al.*, 2002)) así como en estudios de océano abierto (Margen Oceánico Europeo (Santos *et al.*, 2002), Costa Iberica (Coelho *et al.*, 2002); Costa Brasileña (Leitão, 2004), además de las áreas de estudio que se incluyen en el presente proyecto.

En este trabajo hemos mostrado el desarrollo de un modelo hidrodinámico, barotrópico, para la zona de los fiordos australes de Chile (41° S - 46° S). La comparación de las salidas de FIORDOS_NIVEL1 con la información disponible respecto de la evolución del nivel del mar en la zona muestra que el modelo reproduce eficientemente las variaciones de esta variable en diversos lugares tanto en el interior de los fiordos (e.g. Bahía Chacabuco)

como en zonas intermedias (Puerto Montt, Puerto Cuptana) y externas (Ancud). Los estudios sobre corrientes realizados en la zona (e.g. Salinas & Hormazabal, 2004) muestran que la marea es una señal dominante. Este modelo puede, por tanto, ser usado como base conceptual y numérica para el estudio y análisis de sub-sistemas (por medio del anidamiento) al interior de sus límites. Si se considera que FIORDOS_NIVEL1 está implementado por medio del sistema numérico MOHID, entonces se dispone de una amplia gama de herramientas y módulos capaces de ser usados para la generación de modelos de calidad de agua, lagrangianos, de ciclos de nutrientes y para la incorporación de forzantes provenientes de las cuencas hidrográficas. Sin embargo, aún cuando el modelo reproduce de buena forma la señal de la marea, no reproduce algunas características de los flujos de superficie como por ejemplo la unidireccionalidad que caracterizan la circulación del Canal Moraleda (Fierro *et al.*, 2000). Ello

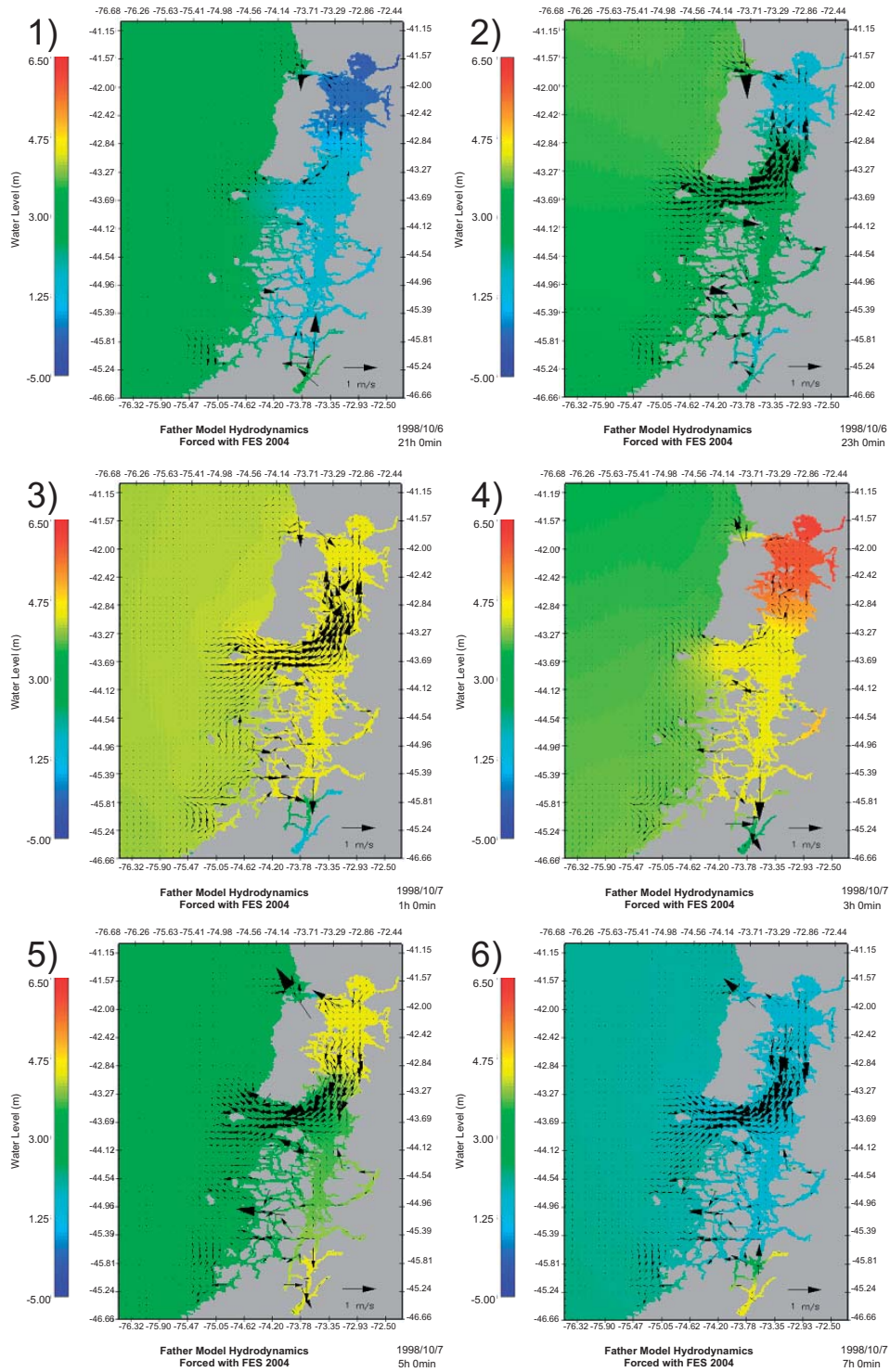


Fig. 5: Secuencia de seis imágenes (ordenadas del 1 al 6) del nivel del mar y de la intensidad de las corrientes para un período de 12 horas en condiciones de sicigia.

Fig. 5: Six image sequence (ordered from 1 to 6) of the sea level and current intensity for a 12-hour period during spring tide condition.

es debido a que FIRDOS_NIVEL1 no incorpora componentes baroclínicas, ni el ingreso de agua desde las cuencas hidrográficas. Ellas deben ser incorporadas para reproducir la estructura vertical que caracteriza la circulación en sistemas estuarinos. De hecho, la implementación de un modelo baroclínico para el fiordo Aysén (en desarrollo) muestra que es posible reproducir tal estructura vertical por medio de MOHID.

Por otra parte, es importante enfatizar la necesidad de contar con una buena base de datos (de libre disposición) respecto de la batimetría en la zona. Experimentos numéricos realizados durante el desarrollo de FIRDOS_NIVEL1 mostraron que debido a la condición mixta que caracteriza a la señal de la marea en zonas tales como el fiordo Aysén (e.g. sub-sistema Boca del Guafó-Canal Moraleda; ingreso de otra señal a través de los canales intermedios entre el océano y los fiordos internos) la altura del nivel del mar en zonas internas es altamente sensible a la batimetría de los canales intermedios. El mejoramiento de la capacidad predictiva de la señal de mareas en diversos sectores al interior del modelo, dependerá por tanto en gran medida de la incorporación de nueva información batimétrica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de ECOMange, proyecto financiado por el Sexto Programa Marco de la Unión Europea bajo contrato N° INCO-CT-2004-003715, del cual ambos autores son co-investigadores y fue parcialmente financiado por fondos del Programa Bicentenario de Ciencia y Tecnología de CONICYT/Banco Mundial y del Concurso de Proyectos para el Crucero CIMAR 9 Fiordos ambos otorgados a V. Marín. Los autores desean agradecer al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile por hacer disponibles los datos de batimetría y de series de tiempo de nivel del mar para la zona de estudios y al Comité Ejecutivo del Programa CIMAR Fiordos por el uso de la base de datos del crucero CIMAR 4 Fiordos.

REFERENCIAS

- ARREQUIN-SANCHEZ, F. ZETINA-REJON, M., MANICKCHAND-HEILEMAN, S. RAMIREZ-RODRIGUEZ, M. & L. VIDAL. 2004. Simulated response to harvesting strategies in an exploited ecosystem in the southwestern Gulf of Mexico. *Ecological Modelling* 172:421-432.
- BATTEEN, M., HU, C.-P., BACON, J. L., & C.S. NELSON. 1995. A numerical study of the effects of wind forcing on the Chile Current system. *Journal of Oceanography* 51: 585-614.
- BELL, C., J.M. VASSIE & P.L. WOODWORTH. 1999. POL/PSMSL TIDAL ANALYSIS SOFTWARE KIT 2000 (TASK-2000), Tech. Rep., Permanent Service for Mean Sea Level, Proudman Oceanographic Lab., Bidston Observatory, Birkenhead, Merseyside.
- BLUMBERG, A.F. & L.H. KANTHA. 1985. Open boundary condition for circulation models. *J. of Hydraulic Engineering, ASCE*, 111: 237-255.
- BOWDEN, K. F. 1983. *Physical oceanography of coastal waters*. Ellis Horwood Limited, New York, USA.
- BRAUNSCHWEIG, F., F. MARTINS, P. C. LEITÃO & R. NEVES. 2003. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case, *Ocean Dynamics*, Volume 53(3), 137 - 145.
- BRAUNSCHWEIG, F., CHAMBEL, P., FERNANDES, L., PINA, P. & R. NEVES 2004. The object-oriented design of the integrated modelling system MOHID, *Computational Methods in Water Resources International Conference*, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- CAMPUZANO, F.J., J.H. ALLEN & T. SCOTT. 2004. The numerical modelling of ecosystem response to nutrients: Application to the Scheldt estuary and plume. IECS (Institute of Estuarine and Coastal Studies)

- report, University of Hull, for the European Commission, contract nº EVK3-CT-2000-00040 "EUROTROPH" (report 2 of 4).
- CANHAM, C., J.J. COLE & W. K. LAUENROTH. 2003. Models in ecosystem science. Princeton University Press, Princeton, USA.
- CASWELL, H.. 2001. Matrix population models. Construction, analysis, and interpretation. Sinauer Assoc. Inc. Publishers, Sunderland, Massachusetts, USA.
- COELHO, H. S., NEVES, R. J.J., WHITE, M., LEITÃO, P.C. & A. J. SANTOS. 2002. A model for ocean circulation on the Iberian coast. *Journal of Marine Systems* 32:153-179.
- DYKE, P. 1996. Modelling marine processes. Prentice Hall, New York, USA.
- ESCRIBANO, R., ROSALES, S. A. & J.L. BLANCO. 2004. Understanding upwelling circulation off Antofagasta (northern Chile): A three-dimensional numerical-modelling approach. *Continental Shelf Research* 24:37-53.
- FENNEL, W. & T. NEUMANN. 2004. Introduction to the modelling of marine ecosystems. Elsevier Oceanography Series 72, Elsevier Scientific Pub. Co., New York, USA.
- FIERRO, J., M. BRAVO & M. CASTILLO. 2000. Caracterización del régimen de mareas y corrientes a lo largo del Canal Moraleda (43° 54' S - 45° 15' S). *Cienc. Tecnol. Mar*, 23:3-14.
- GEODAS, 2006. - <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/geodas/geodas.html> (Último acceso: Enero 2006).
- HEAPS, S. 1987. Three-Dimensional coastal ocean models. Coastal and Estuarine Science 4, American Geophysical Union, Washington D.C., USA.
- IOC, IHO, AND BODC (2003), Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas. Published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans; British Oceanographic Data Centre, Liverpool. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/gebco.html> (Último acceso Mayo 2006).
- LE PROVOST C., F. LYARD, J.M. MOLINES, M.L. GENCO & F. RABILLOUD. 1998. A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter derived data set, *J. Geophys. Res.*, Vol. 103: 5513-5529.
- LE PROVOST, C., 2002. 'FES2002. A New Version of the FES Tidal solution Series', Abstract Volume, Jason{1 Science Working Team Meeting, Biarritz, France.
- LEITÃO, P.C., R. NEVES, H. COELHO, F. BRAUNSCHWEIG & J.C. LEITÃO. 2003. 3D Hydrodynamic Modelling of the Tagus Region of Fresh Water Influence. Proceedings of the 4rd Symposium on the Iberian Atlantic Margin. Vigo, 2003.
- LEITÃO, P.C., J.C. LEITÃO, R. NEVES, G. BERZIN & A.J.R. SILVA. 2004. Hydrodynamics And Transport In The Coastal Zone Of São Paulo - Brazil. Proceedings 29th International Conference of Coastal Engineering, Vol. 3, pp 3316-3328, Lisbon 2004.
- MARÍN, V. H. 1997. A simple-biology, stage-structured population model of the spring dynamics of *Calanus chilensis* at Mejillones del Sur Bay, Chile. *Ecological Modelling* 105:65-82.
- MARÍN, V. H., L. E. DELGADO & R. ESCRIBANO. 2003. Upwelling shadows at Mejillones Bay (northern Chilean coast): a remote sensing in situ analysis. *Invest. Mar., Valparaíso*, 31:47-55.
- MARTINS, F., P. C. LEITÃO, A. SILVA & R. NEVES. 2001. 3D modelling of the Sado Estuary using a new generic vertical discretization approach, *Oceanologica Acta*, 24 (1), 51-62.

- MEADOWS, D., J. RANDERS & D. MEADOWS. 2004. Limits to growth. The 30-Year update. Chelsea Green Pub. Co., White River Junction Vermont, USA.
- NIHOUL, J. C. J. 1975. Modelling of marine systems. Elsevier Oceanography Series, 10. Elsevier Scientific Pub. Co., New York, USA.
- PALMA, W., ESCRIBANO, R., & S.A. ROSALES. 2006. Modeling study of seasonal and inter-annual variability of circulation in the coastal upwelling site of the El Loa River off northern Chile. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67:93-107.
- PENG, G., LESLIE, L. M. & Y. SHAO. 2002. Environmental modelling and prediction. Springer-Verlag, Berlín, Alemania.
- SALINAS, S. & S. HORMAZÁBAL. 2004. Capacidad de transporte de la constricción de Meninea para un flujo de dos capas y el efecto de la corriente de marea. *Cienc. Tecnol. Mar.*, Chile 27:5-15.
- SALOMONS, W., TURNER, R. K., DE LACERDA, L. D. & S. RAMACHANDRAN. 1999. Perspectives on integrated coastal zone management. Springer-Verlag, Berlín.
- SANTOS, A., H. MARTINS, H. COELHO, R. NEVES, P. C. LEITÃO. 2002. A circulation model for the European ocean margin, *Applied Mathematical Modelling*, 26(5), 563-582.
- VILLARREAL, M. R., P. MONTERO, J. J. TABUADA, R. PREGO, P. C. LEITÃO & V. PÉREZ-VILLAR. 2002. Hydrodynamic model study of the Ria de Pontevedra under estuarine conditions, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54, 101-113.