

Numerical Modelling for the Definition of Critical Hydrodynamic Stage related to the Future Submarine Outfall in Puerto Madryn

Corral M., Pagot M., Oroná C., Rodríguez A. and Patalano A.

Laboratorio de Hidráulica FCEFYN – UNC. Address: Av. Hipólito Irigoyen 162, CP: 5000. Córdoba, Argentina.
Phone (Fax): 54 351 433-4446. e-mail: mcorral@com.uncor.edu

Abstract

The city of Puerto Madryn is located in the northeast of the province of Chubut, Argentina ($42^{\circ} 46'$ S and $65^{\circ} 02'$ W), more precisely along the bay “Bahía Nueva” or the extreme west of “Golfo Nuevo”. This location has currently an urban population of about 80,000 inhabitants. The sewer water is driven and treated in mountain lagoons about 130m above sea level. However in some emergency situations such as broken pumps or pipes the untreated effluent runoff and reaches the city storm drains which drive the mixing of both waste and storm water directly to the coast, on the beach. This phenomenon is an environmental issue. To mitigate it, a contingency plan is activated to alert the public to not swim in the affected area as a precaution. In order to solve the actual problem, the Municipality of Puerto Madryn plans to build a submarine outfall to drains the sewer into the sea before any of these emergencies occurs. The Secretary of Ecology and Environment of the Municipality of Puerto Madryn and the University National of Cordoba are developing specific studies under an agreement between both of them for the submarine outfall itself.

This paper presents a summary of studies in order to characterize the hydrodynamics of the bay for the design of a submarine outfall. In this particular case, the coastal currents are highly influenced by the tide, the wind and the waves, so different numerical simulations has been performed to support the design of this type of structure.

To determine the current due to both the tide and the wind, hydrodynamic simulations have been performed with the 3D COHERENS model, while the current produced by waves has been made with the MOPLA model.

In conclusion, the paper presents a summary of hydrodynamics characteristics of the mentioned area, considering all the morphological aspects involved such as the coast alignment and the forcing agents acting (the tide and wind) required in order to define the critical stages of the design of a submarine outfall.

Keywords

Puerto Madryn, outfalls, COHERENS model

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Puerto Madryn se ubica en la región Noreste de la Provincia del Chubut ($42^{\circ} 46'$ latitud Sur y $65^{\circ} 02'$ longitud Oeste), mas precisamente sobre la Bahía Nueva o extremo Oeste del Golfo Nuevo (Figura 1). Esta localidad que en la actualidad cuenta con una población urbana del orden de 80.000 habitantes posee con un sistema cloacal que concentra los desagües sobre la costa y los impulsa para su tratamiento hasta lagunas de estabilización en un sector montañoso que se ubican a una altura de 130 m con respecto a la costa, sin embargo en algunas situaciones de emergencia como rotura de bombas o tuberías el efluente no tratado escurre superficialmente hasta ingresar en los sumideros y conductos pluviales hasta llegar a la costa, saliendo directamente a la playa y generando serios problemas ambientales. Con el objeto de solucionar este problema la Municipalidad de Puerto Madryn prevé la construcción de un emisario submarino que realice la disposición final en el mar ante estas eventuales situaciones de emergencia. El presente trabajo presenta un resumen de los estudios realizados en la zona con el objeto de caracterizar la hidrodinámica de la bahía para el diseño de una obra tipo emisario submarino. En este caso en particular, las corrientes costeras se encuentran influenciadas por el régimen de mareas, la acción del viento y del oleaje, por lo que se han realizado diferentes simulaciones numéricas con el objeto de definir los escenarios críticos para el diseño del emisario.



Figura 1: Ubicación general del Golfo Nuevo y ciudad de Puerto Madryn

METODOLOGIA

Se han combinado herramientas numéricas para determinar las condiciones hidrodinámicas del sector. En particular para obtener las corrientes a la escala del Golfo Nuevo, como por ejemplo por el ingreso y egreso de la onda de marea se ha utilizado el modelo COHERENS.

A su vez para la determinación de las corrientes por viento se han utilizado diferentes metodologías, ya que la incidencia de un esfuerzo cortante sobre la superficie del agua provocará por un lado un gradiente de presión con un campo de circulación en el Golfo y por otro un campo de oleaje que arribará a la costa generando corrientes litorales derivadas de la transformación del oleaje.

Para estimar las corrientes producidas por el esfuerzo de corte por viento se ha utilizado el modelo COHERENS ya mencionado, considerando las diferentes condiciones de borde. A su vez para determinar las corrientes producidas por la llegada del oleaje a la costa se ha realizado la propagación del oleaje con el modelo MOPLA (Morfodinámica de Playas).

Modelo COHERENS

Para la simulación numérica se ha empleado el modelo numérico tridimensional COHERENS (Luyten et al., 1999), desarrollado para costas y plataformas marinas. El mismo se compone de un módulo hidrodinámico, que se puede acoplar al módulo biológico y de contaminación para resolver procesos estacionales y de mesoescala. El código fuente ha sido desarrollado en el período 1990-1998 por un grupo multinacional como parte del proyecto MAST de la Unión Europea (Marine Science and Technology Programme).

Durante las últimas décadas una serie de modelos tridimensionales para costas y plataformas han sido desarrollados por diversas instituciones de investigación (Nihoul y Jamart, 1987; Dyke y Davies, 1992 y Lynch y Davies, 1995). Entre las principales ventajas del modelo COHERENS se destaca que utiliza la técnica “mode-splitting” para resolver la ecuación de momentum 2-D y 3-D como en el Princeton Ocean Model (POM). Además se dispone de diversos esquemas para la turbulencia que varían desde simples expresiones algebraicas de una o dos ecuaciones de energía turbulenta (Mellor, 1998) hasta modelos k-ε.

El modelo COHERENS utiliza en el espacio el método de diferencias finitas conservativas. La grilla elegida para la discretización horizontal es conocida como “Arakawa C” y en la versión disponible no se puede variar el tamaño de los elementos para el detalle en sectores particulares, ya que utiliza una malla rectangular de paso constante.

El modelo COHERENS por ejemplo ha sido aplicado para el estudio de la intrusión de la cuña salina en el Río de La Plata (Destuynder, 2002), descargas fluviales en la laguna Mar Chiquita (Corral et. al, 2009) entre otros trabajos.

Modelo MOPLA

Para propagar el oleaje hasta aguas someras y obtener las corrientes se utilizó la aplicación informática Sistema de Modelado Costero (SMC) que integra una serie de modelos numéricos que permiten implementar la metodología de estudio y diseño de actuaciones en el litoral, propuesta en los Documentos Temáticos y de Referencia, desarrollados por el Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (G.I.O.C) de la Universidad de Cantabria (UC) y la Dirección General de Costas del Ministerio de Medio Ambiente (MMA) dentro del proyecto de investigación: "Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral" (sitio internet <http://www.smc.unican.es/es/index.asp>).

El SMC presenta un modelo de corto plazo o Morfodinámica de Playas (MOPLA), el que permite simular la propagación del oleaje desde profundidades indefinidas hasta la línea de costa y lleva a cabo el cálculo de corrientes inducidas en la zona de rompientes.

CORRIENTES POR MAREAS

El Golfo Nuevo posee unos 70 km de largo y un ancho de 48 Km en su parte central y 17 Km en su boca, con una profundidad máxima de 158 m que se caracteriza por ser más profundo que la plataforma continental adyacente.

La batimetría del Golfo Nuevo y la plataforma continental ha sido tomada de las cartas náuticas H-215 y H-218 del Servicio de Hidrografía Naval. Estos datos batimétricos de distribución irregular fueron interpolados para obtener una malla regular con una resolución de 1 Km con 63 y 66 puntos en X e Y respectivamente (Figura 2).

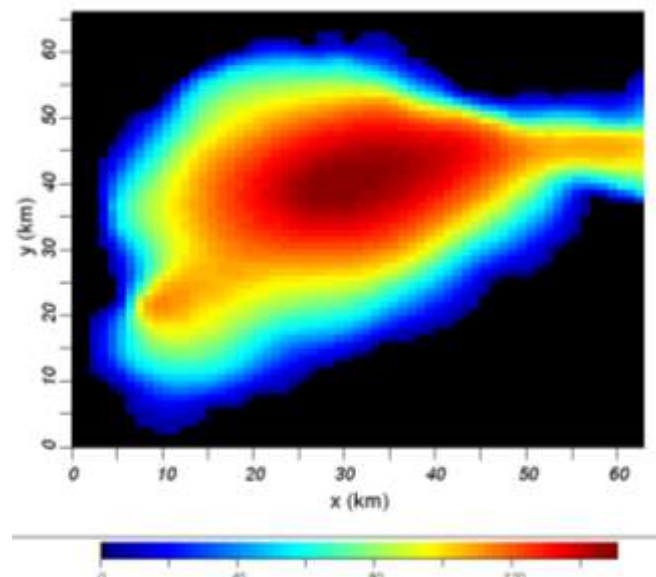


Figura 2: Batimetría del Golfo Nuevo utilizada con COHERENS (profundidad en metros)

En la dirección vertical se utilizaron 10 capas, cuyo espesor varía con el tiempo, ya que el tamaño del paso vertical se adapta a la profundidad local.

El paso de tiempo para el modo barotrópico (gradiente de presión) ha sido de 10 seg., mientras que para el baroclínico (gradiente de flotación) de 60 seg., respetando la condición de Courant-Friedrichs-Levy. Para la turbulencia se ha adoptado un esquema de una ecuación, mientras que para la advección de momento se ha utilizado el esquema "upwind".

Debido a las dimensiones del Golfo Nuevo se ha incorporado para la modelación el efecto de Coriolis, ya que estimaciones preliminares del número de Rossby indican que debe tenerse en cuenta y el modelo COHERENS permite considerarlas.

Como condición de borde se ha fijado una condición de marea semidiurna M2, que representa casi el 90% de la energía total por marea en el Golfo Nuevo (Rivas, 1983). El modelo inicialmente está en reposo, es decir, las velocidades u , v y w son nulas en todo el dominio. Para la frontera abierta

hacia el mar se ha especificado una condición clásica de marea semidiurna con amplitud de 4 m, valor medio de marea en la zona.

En las siguientes figura se presenta la variación de los residuos de niveles y velocidades en el sector del muelle Piedrabuena, observándose que prácticamente a partir de 12 días de simulación se llega a un estado de equilibrio, es decir el nivel y la velocidad pueden ser representados por una función periódica de componente semidiurna, con período 12,42 h.

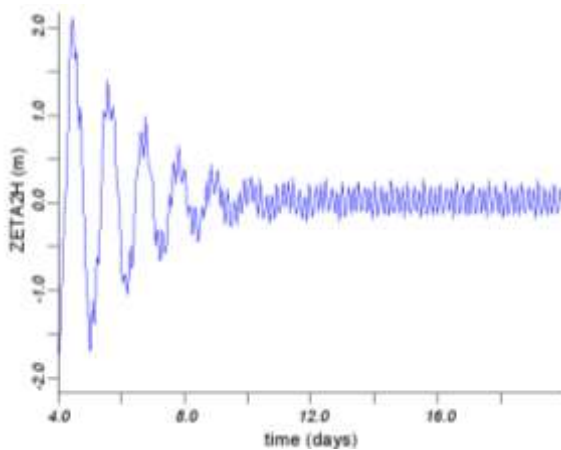


Figura 3: Residuos de niveles en Muelle Piedrabuena

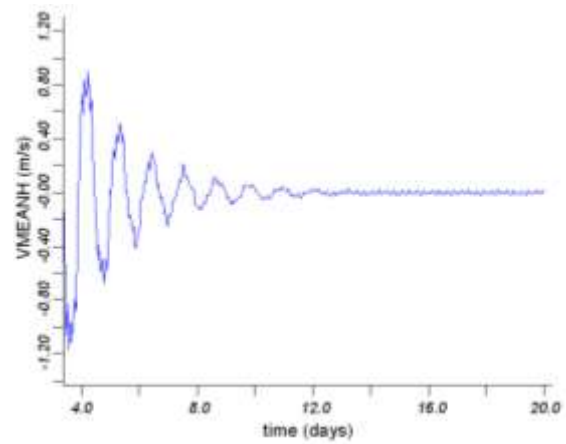


Figura 4: Residuos de niveles en Muelle Piedrabuena

En las siguientes figuras se presenta la circulación general a escala del Golfo Nuevo, destacándose en la primera el ingreso de la onda de marea y en la segunda la salida. A modo de calibración se compararon estas velocidades con las publicadas en Mazio et. al (2004) de una serie de mediciones realizadas cerca de la boca del Golfo, en las cuales se presentaba para una profundidad de 54 m una velocidad de 0,57 m/s, valor similar a los 0,60 m/s obtenidos en las simulaciones con COHERENS.

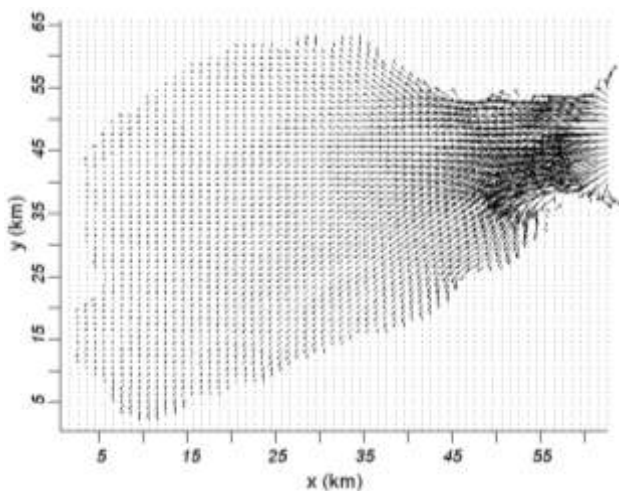


Figura 5: Ingreso de marea al Golfo Nuevo

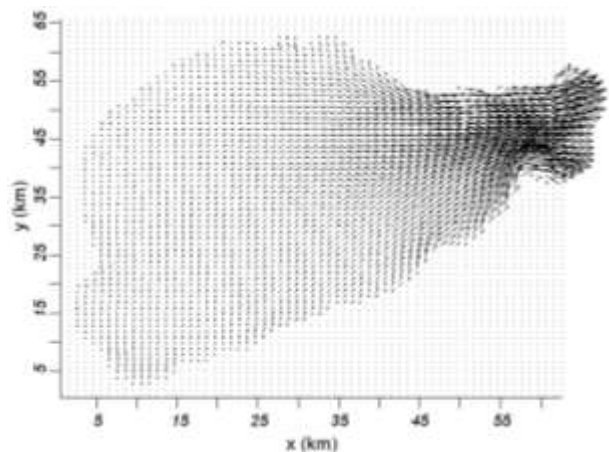


Figura 6: Salida de marea del Golfo Nuevo

En resumen, el proceso de ingreso y egreso de la onda de marea produce mayores velocidades en el sentido perpendicular a la costa (entre 0,04 a 0,08 m/s) que en el sentido paralelo (entre 0,02 y 0,04 m/s).

CORRIENTES POR VIENTO

Modelación con COHERENS

Es importante comentar que para obtener las corrientes por viento se ha realizado simulaciones

hasta obtener un estado estacionario de las velocidades. A modo de ejemplo se presenta en la siguiente figura la velocidad superficial en un nodo ubicado cercano al muelle, en la que se observa que prácticamente a los 10 días se obtiene un estado estacionario, por lo que las simulaciones han sido de una duración de 20 días y se ha tomado el campo de velocidades finales de la simulación.

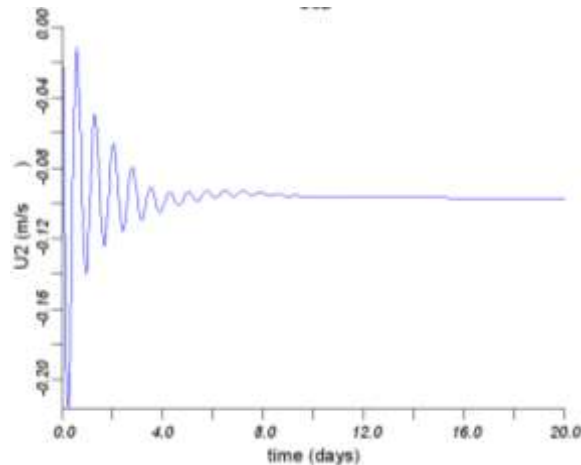


Figura 7: Velocidad superficial en nodo cercano al muelle.

Considerando que la alineación que presenta la costa de Puerto Madryn es prácticamente N-S, para diseñar el emisario se deben analizar los vientos que pueden provocar que la pluma se dirija hacia la costa y no los que provoquen corrientes que se alejen de la costa. Por ejemplo, los vientos predominantes de Puerto Madryn provienen desde el continente (W), pero éstos llevarán la pluma hacia aguas afuera (ver figura) y no serán críticos a la hora de definir las dimensiones del emisario.

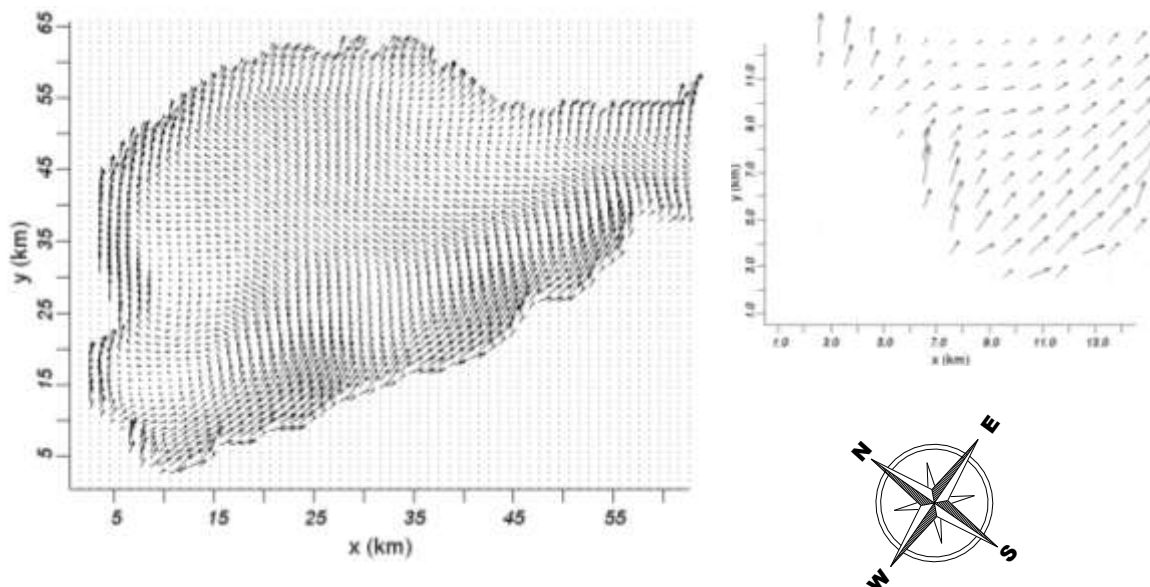


Figura 8: Velocidad superficial con viento 6 m/s de dirección Oeste (W)

Los vientos que provocan que la pluma se dirija hacia la costa son los provenientes desde el octante NE hasta el S, por lo que se han adoptado como escenarios las direcciones NE, E, SE y S. Se simuló estos cuatro escenarios de condiciones medias, basados en las probabilidades que indican las estadísticas de viento.

A modo de ejemplo se presentan los escenarios simulados en estado estacionario para direcciones del viento E y S, en las cuales se ha colocado en la izquierda el dominio completo de la simulación

mientras que en el sector derecho un detalle en el sector de la Bahía Nueva.

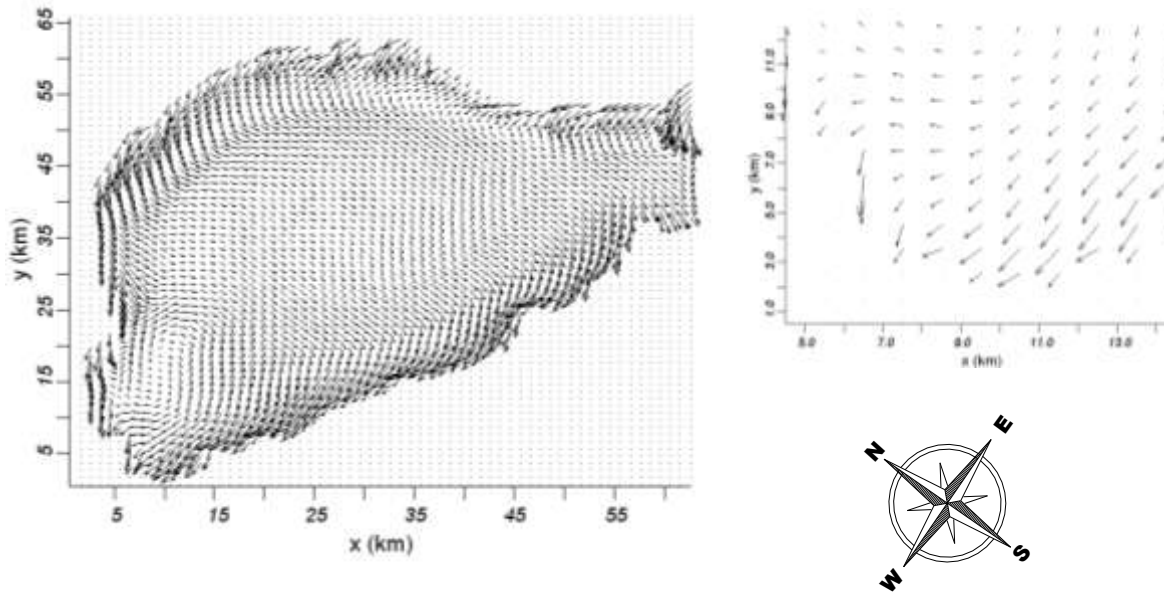


Figura 9: Velocidad superficial con viento 5,4 m/s de dirección Este (E)

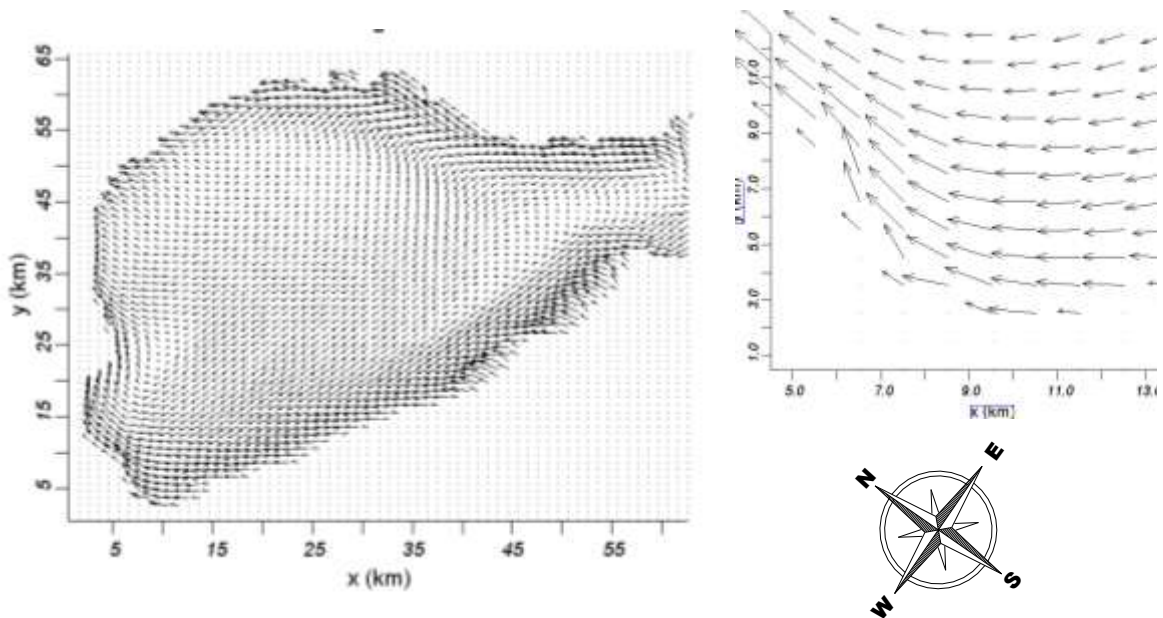


Figura 10: Velocidad superficial con viento 6 m/s de dirección Sur (S)

En resumen, los vientos que provienen desde el NE y el S, los cuales se encuentran más alineados con la costa provocan velocidades longitudinales o litorales con una velocidad de entre 0,10 y 0,15 m/s, mientras que los más perpendiculares al continente como la dirección E provocan velocidades hacia la costa de entre 0,07 a 0,12 m/s.

Modelación con MOPLA

La malla utilizada para correr el MOPLA presenta detalladamente la batimetría cercana a la costa de Puerto Madryn desde la zona de tierra firme hasta una profundidad aproximada de 50 m. La malla se extiende aproximadamente 9765 m de norte a sur y 4252 m de este a oeste. Se orientó con la dirección perpendicular al borde exterior a 270° (desde el norte). Se requirió una resolución muy

alta (celdas de 21 m x 39 m) para representar adecuadamente todas las características batimétricas que pudieran influenciar en la propagación del oleaje.

A lo largo del borde offshore se especificaron datos de ingreso consistentes en olas monocromáticas. Los parámetros representativos del oleaje fueron derivados en base a las propiedades espectrales del oleaje: 1) H_{mo} , altura significativa basada en la energía; 2) T_p , período de pico; 3) θ_m , dirección media de propagación; y 4) Altura de la marea.

Se consideraron ocho escenarios de condiciones medias derivados de las corridas del modelo STWAVE, que se presentan en el capítulo 4 del informe realizado por Taylor Engineering, Inc. - ETT S.A (2001) a pedido de la Administración Portuaria de Puerto Madryn. Las condiciones medias representan las condiciones típicas o características del oleaje que pueden presentarse, basadas en las probabilidades que indican las estadísticas de viento y oleaje. Representan una combinación de oleaje generado localmente y oleaje oceánico.

En la siguiente figura se presenta a modo de ejemplo los resultados obtenidos considerando oleaje desde la dirección E, siendo la primera vectores con la dirección principal del frente de ola que se propaga hacia la costa y la segunda una ampliación del campo de velocidades en la zona cercana al muelle donde se proyecta la descarga del emisario.

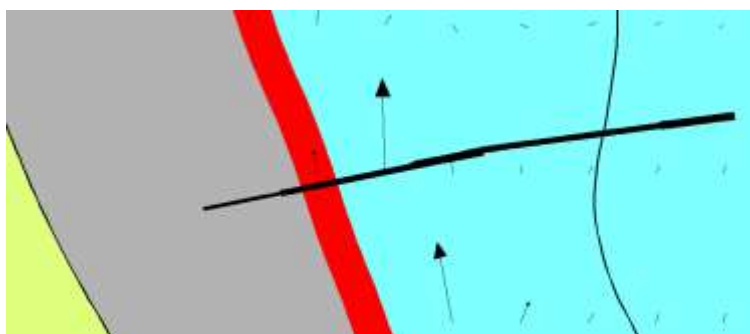


Figura 11: Ampliación del campo de velocidades en la zona del muelle (E)

Los valores máximos de corrientes son del orden de 0,30 m/s para el escenario con viento del NE a aproximadamente 25 metros de distancia de la costa. En todos los casos a 50 metros de la línea de costa la velocidad de la corriente no es superior a 0,03 m/s en una profundidad de aproximadamente 0,40 m. A 75 metros de distancia de la costa, en una profundidad de aproximadamente 1.3 m, las velocidades son prácticamente despreciables en todos los casos.

La dirección predominante de tales corrientes es de Sur a Norte a excepción del escenario con viento ESE en el que se invierte.

CONCLUSIONES

De la modelación efectuada con el modelo COHERENS para representar el ingreso y egreso de la onda de marea, surge que por un lado los niveles y velocidades pueden ser representados por una función periódica que en términos prácticos no tiene atenuación o ampliación en cuanto a la amplitud ni el período, con respecto a la onda en la boca del Golfo.

El ingreso de la onda de marea produce mayores velocidades en el sentido perpendicular a la costa (entre 0,04 a 0,08 m/s) que en el sentido paralelo (entre 0,02 y 0,04 m/s).

De las simulaciones realizadas con viento surge como es esperable que los vientos predominantes de Puerto Madryn, los cuales provienen desde el continente (W), llevarán la pluma de efluentes hacia aguas afuera y no serán críticos para el diseño del emisario.

Los vientos que provocan que la pluma se dirija hacia la costa son los provenientes desde el octante NE hasta el S y de las simulaciones se desprende que los casos en que los vientos se encuentran más alineados con la costa (NE y S) provocan velocidades longitudinales o litorales con una velocidad

de entre 0,10 y 0,15 m/s, mientras que los más perpendiculares al continente como la dirección E provocan velocidades hacia la costa de entre 0,07 a 0,12 m/s.

Los valores máximos de corrientes derivadas del oleaje se encuentran en la zona de rompiente, a una distancia que se encuentra entre 20 y 30 m de la costa, mientras que ya a 75 m de la costa, las velocidades son prácticamente despreciables en todos los casos. La dirección predominante de tales corrientes es de Sur a Norte a excepción del escenario con viento ESE en el que se invierte.

Es importante comentar que el proyecto presente se encuentra todavía en desarrollo y se encuentra en la fase de análisis de los escenarios críticos para el diseño.

REFERENCIAS

CENPAT – CONICET. *Estadísticas Climatológicas. Frecuencia de dirección y Velocidad de Viento*. Área Física Ambiental. Centro Nacional Patagónico. Por Frumeto, O. y Davies, E (2000). <http://www.cenpat.edu.ar/fisicambien/climaPM.htm> (2000).

Corral M., Rodríguez A., Pagot M., Fernández R., Pozzi C. y Oroná C. *Modelación numérica de descargas fluviales en la laguna de Mar Chiquita*. Mecánica Computacional, (García Bauza C.D., Lotito P.A., Parente L.A. y Vénere M.J. Eds.), Publicación de AMCA, Vol. XXVIII, pgs. 2787-2803, Tandil. ISSN 1666-6070.(2009)

Destuynder, V., *Modelación Hidrodinámica Tridimensional del Río de la Plata*, Tesis de ingeniería para la Universidad de Lyon (Francia). Director: Tarela, P.A. (2002)

Dyke P.P.G. and Davies A.M. (Editors), *Mathematical models of the North Sea and surrounding continental shelf seas*. Proceedings of JONSMOD 90, Birkenhead, U.K., 2–5 April 1990. Continental Shelf Research, 12(1), 211 pp.(1992).

Lanfredi N. W. *Corrientes superficiales en aguas costeras del Golfo Nuevo*. Centro Nacional Patagónico. Serie Informes Científicos 1: 1-15.(1974).

Luyten P.J., Jones J.E., Proctor R., Tabor A., Tett P. and Wild-Allen K., *COHERENS – A Coupled Hydrodynamical-Ecological Model for Regional and Shelf Seas: User Documentation*. MUMM Report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, 914 pp. (1999)

Lynch D.R. and Davies A.M. (Editors), *Quantitative skill assessment for coastal ocean models*. Coastal and Estuarine Studies, Vol. 47, American Geophysical Union, Washington D.C., 510 pp. (1995).

Mellor, G., *User Guide for a Three Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model*, Princeton University, 1-43. (1998)

Nihoul J.C.J. and Jamart B.M. (Editors), *Three-dimensional models of marine and estuarine dynamics*. Elsevier Oceanography Series, Vol. 45, 624 pp. (1987).

Smith S.D. and Banke E.G., *Variation of the sea surface drag coefficient with windspeed*, Quarterly Journal Meteorological Society, 101, 665–673 (1975).

Rivas A. L. *Análisis de la circulación costera en Golfo Nuevo*. Acta Oceanographica Argentina, 3 (2) :49-66. (1983).

Taylor Engineering, Inc. – ETT S.A. Determinación del clima de olas en muelles Luis Piedrabuena y Almirante Storni. Informe Final. Administración Portuaria Puerto Madryn (2001).