

DINÁMICA LITORAL EN EL ENTORNO DE LA ESCOLLERA SUR DEL PUERTO DE MAR DEL PLATA

R. A. Cáceres¹ y R. D. Castellano²

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta un estudio mediante modelación matemática de la dinámica litoral en el entorno de la Escollera Sur del Puerto de Mar del Plata. Particularmente se analiza el comportamiento morfológico de un banco de arena desarrollado en el extremo de la escollera y sobre el canal de acceso al puerto.

Se demuestra que el proceso hidrodinámico provocado por el oleaje en el extremo de la escollera es el principal mecanismo responsable de la sedimentación. Asimismo, la modificación de la línea de costa que se ha producido desde la construcción de la Escollera Sur producto de un desbalance sedimentario, ha corrido la franja denominada “*zona activa o litoral*” hacia el mar. Esto implica que toda la Escollera Sur y boca de acceso al puerto se encuentran dentro de la zona de mayores cambios morfológicos, generando un permanente movimiento de sedimentos, que dependiendo de las condiciones hidrodinámicas, podrá provocar depósitos o erosión.

Palabras claves: Puerto de Mar del Plata, sedimentación, geomorfología costera, modelación matemática.

1. INTRODUCCIÓN

El Puerto de Mar del Plata, ubicado en la Costa Atlántica de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, es una terminal multipropósito con una importante industria pesquera a nivel regional, y un creciente turismo. El puerto posee dos obras de abrigo, la Escollera Sur, que con una longitud aproximada de 2.7 km protege del clima de olas predominante, y la Escollera Norte que con una longitud de 1.1 km resguarda al puerto del oleaje proveniente de los sectores N y NE (Figura 1).

Desde la construcción del Puerto de Mar del Plata (1913 – 1922), se observaron cambios significativos en su entorno costero. En la Figura 2 se muestran un plano del Pueblo de Mar del Plata [Museo Mitre, c. 1890] y un plano del proyecto de construcción del puerto, donde se observa que el mismo fue construido sobre la línea de costa con la Escollera Sur orientada en su arranque en dirección E, para luego tomar una orientación NNE – NE. Las profundidades alcanzadas estuvieron entre 10 y 12 m. En la Figura 3 se muestra un plano del entorno del Puerto de Mar del Plata en 1939 (Becerini y Marengo, 2002), donde se observa que la costa comenzaba a recrecer en la zona sur respecto del plano del proyecto de construcción de la Figura 1. En la otra imagen de la Figura 3 se presenta la publicación del Servicio de Hidrografía Naval en 1975, donde es posible observar que las líneas batimétricas de 1 a 2 m han avanzado muy cerca del morro de la escollera.

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata

² Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua



Figura 1: Ubicación general (izquierda) y vista aérea del Puerto de Mar del Plata (derecha).

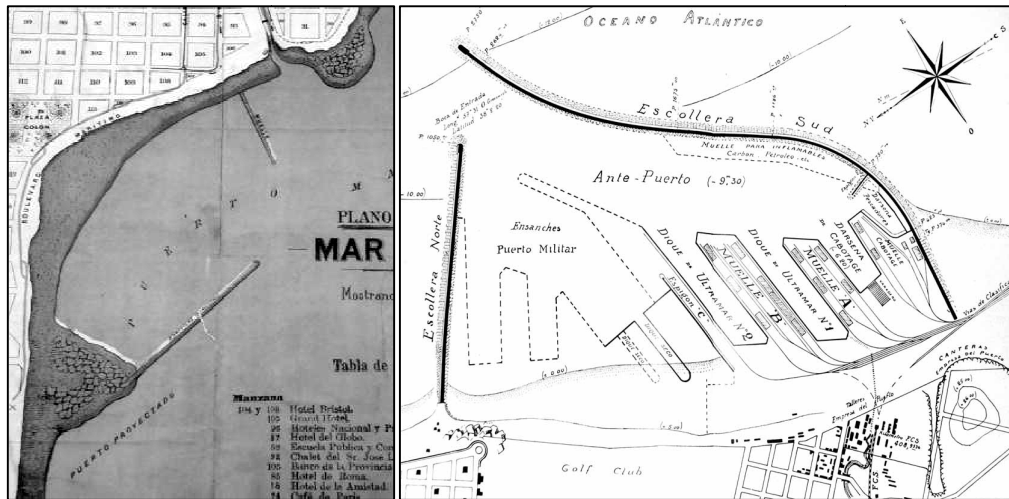


Figura 2: Plano general del Pueblo de mar del Plata [Museo Mitre, c. 1890] (izquierda), y plano del proyecto original del Puerto de Mar del Plata (Fundación Histarmar, 2003) (derecha).

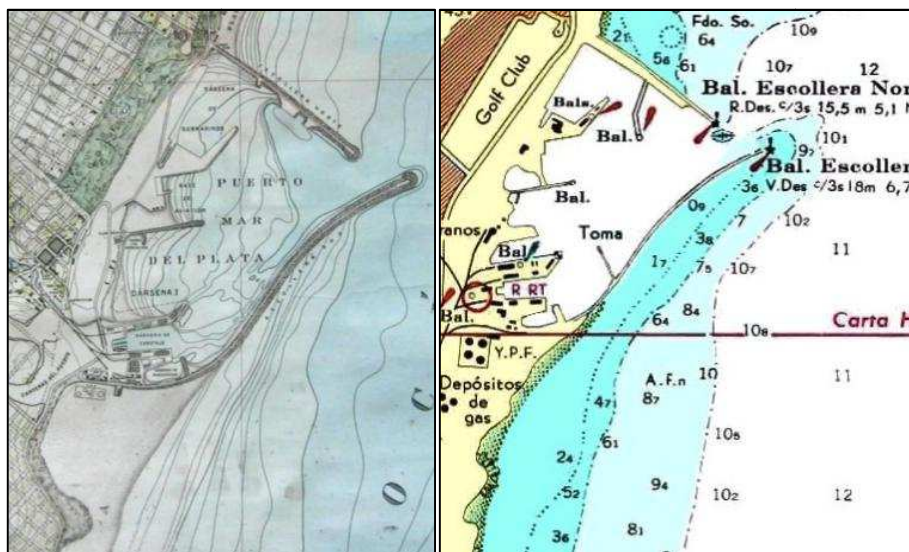


Figura 3: Plano general del pueblo de Mar del Plata en 1939 (Becerini y Marengo, 2002), y extracto de la carta náutica H250 Rada Mar del Plata (SHN, 1975)

La enfilación original del canal de acceso al puerto fue de 238° N (considerando 0° en el N, y giro positivo en sentido horario). Luego de la formación del banco de arena, el problema de la profundidad disponible para el acceso fue parcialmente resuelto con una nueva alineación a 208° .

Los estudios de sedimentación y erosión costera, así como la estimación de volúmenes de dragado de mantenimiento, son temas fundamentales a tener en cuenta para el proyecto y operación de un puerto. La comprensión integral de estos aspectos permiten reducir los impactos en el ambiente costero cercano a las obras (incluyendo el acceso al puerto) y de zonas más alejadas (playas vecinas), como así también prever las medidas de mitigación correspondientes para las obras ya construidas. En el presente trabajo se desarrolla un estudio mediante modelación matemática hidrodinámica y morfológica en el entorno de la Escollera Sur del Puerto de Mar del Plata. El modelo aplicado fue validado y calibrado a partir de una serie de relevamientos batimétricos realizados en el año 2009.

2. METODOLOGÍA

La evolución de la línea de costa a mediano o largo plazo está vinculada a la existencia de gradientes espaciales de las tasas de transporte litoral total. Para la cuantificación de este tipo de problemas la modelación matemática aparece como una herramienta valiosa. La validación de estos modelos requiere asimismo del conocimiento de eventos históricos, lo que implica la descripción en el tiempo en un lapso suficientemente prolongado, de las variables físicas (olas, nivel del mar, y corrientes), y de los cambios morfológicos ocurridos en el lecho marino como respuesta a dichas variables físicas. A continuación se presentan la base de datos disponible y el modelo aplicado. Luego se aplican una serie de formulaciones que permiten analizar el transporte de sedimentos.

OLAS

Para el presente trabajo se dispuso de una serie de tiempo de datos de olas de un *Modelo Global de Olas*. La serie corresponde al año 2009 en las coordenadas geográficas 57.5° W, 39° S, y se compone de valores cada 3 horas de altura significativa total, período medio espectral, período pico espectral, y dirección del oleaje.

NIVEL DE MAR

El área de estudio presenta un régimen de marea mixto preponderantemente semidiurno, con un nivel medio de 0.91 m, una pleamar media de 1.32 m y bajamar media de 0.52 m, todos referidos al plano de reducción local. Para el presente trabajo se dispuso de un registro del nivel de mar correspondiente al año 2009 en el Puerto de Mar del Plata, provisto por el Servicio de Hidrografía Naval. En la Figura 4 se presenta un gráfico de frecuencia acumulada, donde se observa que más el 95 % del tiempo los niveles no superaron 1.75, y el nivel de 0.95 m presenta una frecuencia del 50 % del tiempo. El nivel máximo registrado en el año 2009 fue de 3.04 m, lo que significa la presencia de una marea meteorológica de más de 1 m respecto de la marea astronómica.

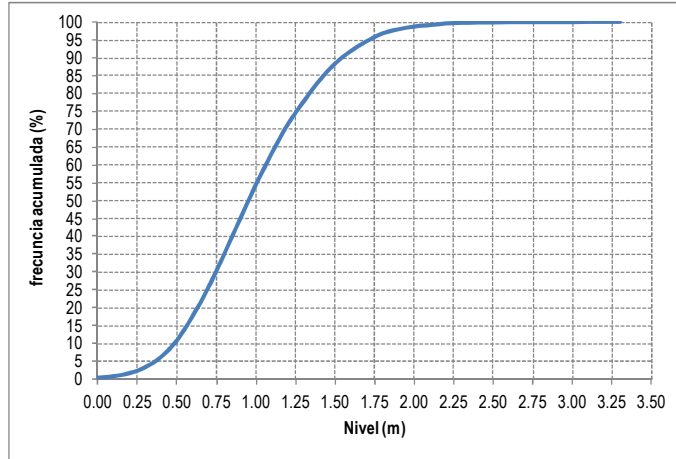


Figura 4: Distribución acumulativa del nivel del mar (Puerto de Mar del Plata, año 2009)

SEDIMENTOS

Se dispuso de los datos correspondientes a la granulometría de dos muestras obtenidas sobre la cresta del banco de arena. En la Figura 5 se presentan las respectivas curvas granulométricas de donde se obtiene un $d_{50} = 0.21 \text{ mm}$. Asimismo, se pueden obtener $d_{84} = 0.32 \text{ mm}$ y $d_{16} = 0.13 \text{ mm}$, lo que permite calcular el parámetro de graduación de la muestra (*geometrical deviation or spreading*) $\sigma_g = (d_{84}/d_{16})^{0.5} = 1.57$, el cual será utilizado para el cálculo de transporte de sedimentos.

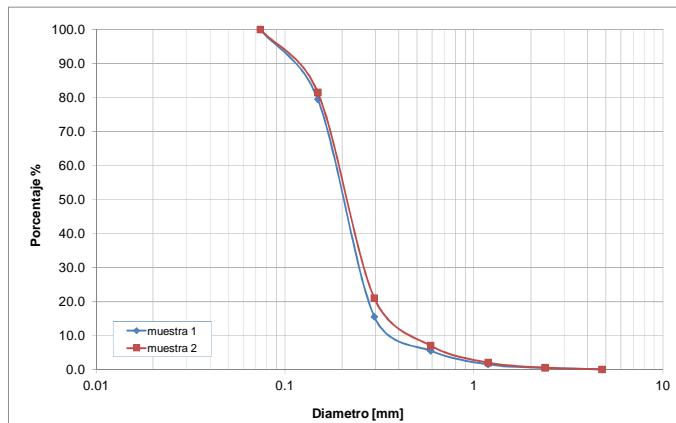


Figura 5: Curvas granulométricas del banco de arena del acceso al Puerto de Mar del Plata (Fuente: Departamento de Costa Marítima de la Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas, Ministerio de Infraestructura de la Provincia de Buenos Aires).

CORRIENTES DE MAREA

Las corrientes de marea en la zona de estudio presentan bajas velocidades. La onda de marea antes de llegar a pleamar se propaga desde el S hacia el N - NE, con una velocidad de 0,13 m/s, dependiendo en gran medida de los vientos (Bertola, 2006). Luego en el período de tiempo antes de la bajamar, la marea se dirige hacia el S - SW. Para el presente estudio las corrientes de marea no fueron tenidas en cuenta debido a su relativa baja influencia en los cambios morfológicos locales.

BATIMETRÍA

Se dispuso de diez relevamientos batimétricos realizados en 2009 en la zona de estudio con sondajes en el banco de arena y en el acceso al puerto. Estas

batimétrías corresponden al 12 de enero, 24 de febrero, 14 de abril, 27 de mayo, 15 de julio, 5 de agosto, 24 de septiembre, 28 de octubre, 23 de noviembre, y 21 de diciembre. Dichos relevamientos fueron tomados para la validación del modelo morfológico.

Asimismo, para la generación de modelo digital de terreno se utilizaron cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval, a saber, H210 “De Faro Punta Mogotes a Faro Claromecó” (escala 1:250.000), H250 “Rada Mar del Plata” (escala 1:50.000), y H251 “Puerto de Mar del Plata” (escala 1:5.000).

TRANSPORTE LITORAL

Diversos estudios indican que el transporte de arenas por acción del oleaje presenta movimientos netos hacia el Norte y Noreste a lo largo de las playas del sur de la Provincia de Buenos Aires (Isla, 2006 y Bertola, 2006). Particularmente en las costas de Mar del Plata y Miramar se estimaron tasas netas de transporte litoral entre 400.000 y 700.000 m³/año (Caviglia et al., 1992).

La evolución de la línea de costa está vinculada a la existencia de gradientes de las tasas de dicho transporte litoral de sedimentos. Con el fin de evaluar en forma preliminar la morfodinámica costera en el entorno de la Escollera sur del Puerto de Mar del Plata, se aplicó la formulación del CERC (1998) para calcular el transporte sólido litoral potencial.

Cuando los trenes de olas se aproximan a la costa, y dependiendo de sus parámetros y la morfología de la playa, se genera una *zona de rompiente* y una zona adyacente denominada *zona de deslizamiento*. En esta última zona se produce un transporte de masa con componentes normales y paralelas a la costa, generándose un lavado ascendente y retrocedente que provoca un transporte de sedimentos por *deriva litoral* a lo largo de la playa frontal en *zigzag*. Asimismo, el proceso de apilamiento de agua contra la costa se descarga lateralmente a través de una *corriente longitudinal* (Perillo, 2003).

La fórmula del CERC (1988) considera que el flujo de energía del oleaje por unidad de longitud de costa, es el responsable del transporte de sedimentos longitudinal. Para esta formulación, el caudal de transporte depende de la altura de ola significativa en rotura, el ángulo de incidencia del frente de oleaje, la densidad relativa del material y un factor de calibración (K). Esta fórmula es aplicable principalmente a playas de arena (diámetros menores que 0.2 a 1 mm aproximadamente). Asimismo, se considera que las líneas batimétricas son rectas y paralelas.

La expresión de cálculo propuesta por el CERC (1998) es la siguiente:

$$Q_L = \frac{K}{(S-1)(1-p)} * \sqrt{\frac{g}{k}} * H_{sb}^{5/2} * \text{sen}(2\alpha_b) * f(H_o, T, \alpha_b)$$

Donde:

Q_L : caudal de transporte de sedimento [m³/s]

K : coeficiente empírico de transporte

S : densidad relativa del sedimento

H_{sb} : altura de ola significativa en rotura

α_b : ángulo de incidencia del frente de ola

k : índice de rotura (relación entre la altura de ola de rotura y la profundidad).

$f(H_o, T, \alpha_b)$: frecuencia del oleaje según distribución de altura, período y dirección.

Debido a que el caudal de transporte de sedimentos varía sustancialmente con el cambio de orientación de la costa, para la aplicación de la fórmula de transporte se realizó una división en distintos tramos, para los cuales se supuso una orientación constante y allí se realizó el cálculo de Q_L . A fin de observar los gradientes de transporte, en la Figura 6 se presentan los resultados en valores relativos (considerando que el transporte en el tramo con orientación 0° tiene un valor igual a 1). Con este análisis se demuestra que, desde el arranque de la Escollera Sur, y a medida que se consideran sectores más próximas al morro de la misma, la tasa de transporte neto se reduce gradualmente hasta ser nula, resultando este desbalance en una tendencia a la sedimentación en la playa adyacente y en las cercanías del extremo de la estructura.



Figura 6: Orientaciones de la línea de costa y valores de Q_L relativos (considerando que el transporte en el tramo con orientación 0° tiene un valor igual a 1).

Otro aspecto con el cual se puede caracterizar la morfodinámica costera es la determinación de la *zona activa o litoral*. En esta zona se producen cambios mensurables en la morfología costera (Nicholls et al., 1998). Hallermeier (1981) propone una expresión para determinar la profundidad activa:

$$d_{l,t} = 2.28H_{e,t} - 68.5\left(\frac{H_{e,t}^2}{gT_{e,t}^2}\right)$$

Donde:

$H_{e,t}$: Altura de ola significativa con frecuencia de excedencia del 0.137% por año "t" (t = 12 horas por año)

$T_{e,t}$: Período del oleaje asociado

Del análisis de clima de olas que se presentará en párrafos posteriores, se obtiene:

$H_{e,t} = 3.75$ m y $T_{e,t} = 9$ s

Con lo cual resulta una profundidad de cierre:

$d_{l,t} = 7.3$ m

Cabe mencionar que la profundidad de cierre es un concepto simple, pero su predicción resulta muy compleja debido a que su valor depende de la escala temporal y espacial elegida, y de las condiciones de cada sitio de estudio (Nicholls et al., 1998). No obstante, permite estimar la zona de mayores cambios morfológicos en la zona de estudio.

MODELO MATEMÁTICO

En el presente trabajo se utilizó el sistema de modelización MIKE 21/3 Coupled Model FM de la empresa DHI Water & Environment, Inc. El mismo está compuesto por un Modelo hidrodinámico, un Modelo de transporte de sedimentos no cohesivos, y un Modelo espectral de oleaje.

Este sistema integrado permite combinar oleaje, flujo y transporte de sedimentos en un solo modelo morfológico. La resolución del sistema se realiza mediante la aplicación de elementos finitos en una malla flexible (Flexible Mesh, FM) no estructurada, y formada por elementos triangulares y/o cuadrangulares (DHI, 2011a).

El modelo hidrodinámico (MIKE 21 HD) calcula las variaciones del nivel del agua y flujo en respuesta a fuerzas externas. Dicho módulo permite simular efectos de inundación y secado, dispersión de cantidad de movimiento por fluctuaciones turbulentas, tensiones tangenciales de fondo, y flujos potenciales de mareas. Este modelo está basado en las ecuaciones para aguas someras, integradas en la vertical, y con la aproximación de Reynolds basada en la descomposición de las variables de flujo en su valor medio más la fluctuación (conocidas como las ecuaciones RANS: Reynolds Average Navier-Stokes), con la aplicación de la hipótesis Boussinesq para la resolución del sistema (DHI, 2011a).

El modelo espectral del oleaje (MIKE 21 SW) está basado en mallas no estructuradas, que simula el crecimiento, decaimiento y transformación de olas

locales generadas por viento y olas oceánicas (DHI, 2011b). MIKE 21 SW es particularmente aplicable para la predicción del clima de olas en grandes áreas, así como también para estudios localizados en zonas costeras. El modelo tiene en cuenta el crecimiento de olas por acción del viento, interacciones no lineales ola-ola, disipación debido al descrestamiento (white-capping), disipación debido a la fricción de fondo, disipación por rotura de ola debida al fondo, refracción y bajo debidos a cambios de profundidad, y la interacción ola-corriente.

El modelo de transporte de arena (MIKE 21 ST Q3D), calcula la tasa de transporte de sedimentos y los cambios del nivel de fondo del mar debido a la acción combinada de olas y corrientes. MIKE 21 STQ3D resuelve la variación espacial y temporal de la tensión de corte, velocidad de flujo y concentración de sedimentos utilizando el modelo de Fredsøe (1984). El modelo determina el transporte de sedimentos con una aproximación "Quasi 3D". Es decir, en cada posición donde se evalúa el transporte, la estructura vertical del flujo horizontal se calcula en base a la velocidad promedio en la vertical computada por un modelo bidimensional (como MIKE 21 HD) y la distribución vertical de las tensiones de corte.

La carga total de sedimentos se considera como la suma del transporte de fondo y en suspensión. El transporte de material no-cohesivo como carga de fondo es calculado por el modelo presentado por Engelund y Fredsøe (1976), desarrollado para incluir la combinación de olas y corrientes, y las condiciones de la zona de la rotura. El transporte de fondo es determinado en función de la tensión de corte por medio del parámetro de Shields θ (DHI, 2011c):

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gd}$$

Donde s es la densidad relativa del sedimento, g la aceleración de la gravedad, d el diámetro del grano y U_f la velocidad de corte. El método asume que el transporte de fondo corresponde a la tensión de corte instantánea inducida por acción de las olas y la corriente. El transporte en suspensión se describe por medio de la concentración de sedimentos C , la cual es determinada por la ecuación de difusión turbulenta vertical:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right) + w \frac{\partial C}{\partial z}$$

Donde t es el tiempo, z la coordenada vertical, ε_s el coeficiente de difusión turbulenta, y w la velocidad de caída (settling) del sedimento. El factor ε_s se toma igual a la velocidad turbulenta de remolino del campo de flujo (DHI, 2011c). La condición de borde cerca del fondo está dada como la concentración C_b para un nivel $z = 2d$, donde d es el tamaño del grano. El transporte de sedimentos suspendidos promedio, q_s , sobre un período, T , se calcula como el producto de la concentración y la velocidad del flujo, integrados en el tiempo y en la vertical (entre $2d$ y la profundidad D) (DHI, 2011c):

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D C U dy dt$$

MALLA DE MODELACIÓN Y BATIMETRÍA

Para la selección del dominio de cálculo se debe considerar una zona de estudio suficientemente grande para que los modelos de ola e hidrodinámico tengan espacio para ajustarse a las fuerzas dinámicas actuantes, y llegar a un estado de equilibrio que represente con un grado de aproximación aceptable la situación real en la zona de interés. También se deben evitar efectos de frontera en la solución.

Asimismo, durante la selección de la densidad de la malla debe considerarse que el tamaño y separación de los elementos indica el límite entre la zona resuelta y la no resuelta. Un tamaño mayor del elemento afecta directamente a la disipación de energía en el módulo hidrodinámico, aumentando así la incertidumbre en la predicción (Jones et al., 2007). Para optimizar los tiempos computacionales y mantener una buena resolución de la malla de cálculo, MIKE 21 FM, permite la selección de subdominios de cálculo con diferentes resoluciones y formas según el alcance del estudio.

En el presente trabajo se realizaron dos tipos de simulaciones. En primer lugar, una modelación de transformación y generación del oleaje desde la zona oceánica, donde se encuentra la información disponible del *Modelo Global*, hasta la zona costera. Si bien MIKE 21/3 Coupled Model permite trabajar en forma acoplada el modelo de olas, el hidrodinámico y el de transporte de sedimentos, se determinó primero el oleaje en la zona costera con MIKE 21 SW debido al significativo tamaño de la malla resultante (aproximadamente 90 km de extensión a lo largo de la costa y 60 km hacia el mar, 43602 nodos y 69101 elementos).

Los elementos triangulares de dicha malla tuvieron lados de aproximadamente 2000 m en la zona exterior y 100 m en la zona costera. Las profundidades máximas alcanzadas en la batimetría se encuentran cerca de los 100 m.

Para la modelación morfológica el dominio seleccionado posee una extensión total de aproximadamente 6500 m de longitud y 4000 m en sentido perpendicular a la costa, con 8 subdominios con elementos triangulares de tamaño decrecientes a medida que se aproxima a la zona de interés. La malla resultante posee 17009 nodos y 33411 elementos. Los elementos poseen lados de 250 m en el borde oceánico y 11 m en la zona de detalle sobre el banco de arena.

En la Figura 7 se presentan las batimetrías resultantes. Cabe mencionar que en el interior del puerto no fue representado con detalle las profundidades debido a que no afecta los resultados del presente trabajo. En la Figura 8 se muestra una vista tridimensional del modelo digital de terreno en torno al acceso al Puerto de Mar del Plata incluyendo la malla.

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO MORFOLÓGICO

El modelo morfológico ha sido calibrado y validado contra los 10 relevamientos batimétricos disponibles en el presente trabajo. A partir de dichas simulaciones se adoptó un paso de tiempo igual a 1800 s, en el modelo hidrodinámico se adoptó el coeficiente de viscosidad de remolino (constante de Smagorinsky) igual a 0.8, y para la resistencia de fondo se tomó un valor del coeficiente de Manning igual a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Para el módulo espectral de olas se utilizó el modelo de Battjes y

Janssen (1978) con un parámetro de rotura por profundidad $\gamma_2 = 0.9$, mientras que para el modelo de transporte de sedimentos se utilizó un diámetro medio $d_{50} = 0.21 \text{ mm}$ para todo el dominio, un coeficiente de graduación $\sigma_g = 1.57$ y porosidad $n = 0.3$.

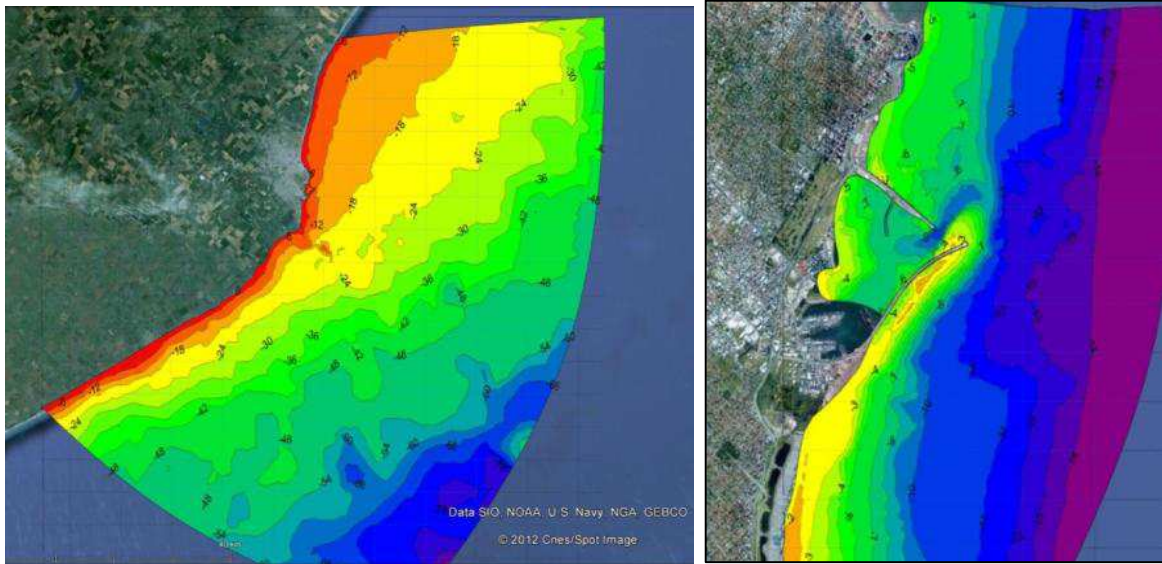


Figura 7: Batimetría en el área modelada (izquierda: dominio para modelo de generación y transformación de olas, derecha: dominio para modelo acoplado).

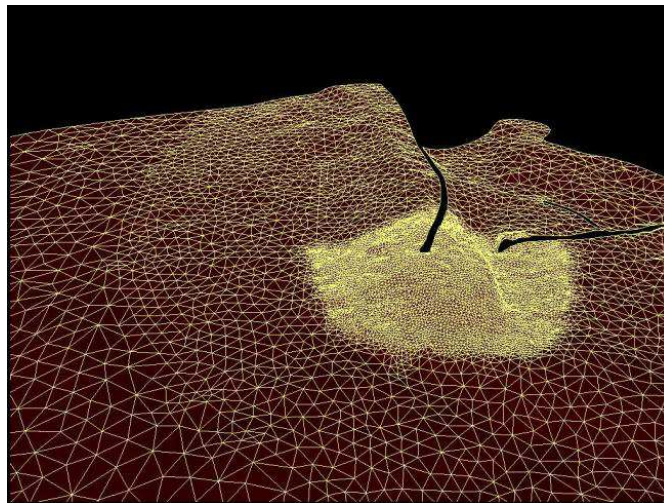


Figura 8: Vista 3D del modelo digital de terreno en la zona del banco de arena y acceso al Puerto de Mar del Plata

3. RESULTADOS

CLIMA DE OLAS EN LA COSTA

La información disponible fue procesada con el propósito de poder describir sintéticamente las características del oleaje generado por el Modelo Global, evaluando en primer lugar la distribución frecuencial de las variables características (dirección de propagación, altura significativa y períodos). La presentación de los resultados se efectúa por medio de la Tabla 1, histogramas de la Figura 9 y las rosas de olas en la Figura 10. Se observa en la Tabla 1 que

las mayores frecuencias de altura y periodo de olas corresponden a 1.0 a 1.5 m (42 % del total de datos) y 8 a 12 s (46 % del total de datos), respectivamente. La altura y períodos de ola promedios fue 1.2 m y 8 s, respectivamente. En cuanto a las direcciones de procedencia con mayor frecuencia fueron SSE – S con el 35 % del total de datos, para el período de análisis.

		Tp (s)								
		0	2	4	6	8	10	12	14	
Hs (m)		2	4	6	8	10	12	14	16	
0	- 0.5	0	0	11	6	4	4	0	0	25
0.5	- 1	3	76	298	123	216	175	40	1	931
1	- 1.5	0	40	459	134	290	248	49	1	1220
1.5	- 2	0	2	86	70	113	141	68	0	480
2	- 2.5	0	0	3	27	42	59	30	0	161
2.5	- 3	0	0	1	2	21	14	19	0	57
3	- 3.5	0	0	0	1	11	9	8	0	29
3.5	- 4	0	0	0	0	2	2	6	0	10
4	- 4.5	0	0	0	0	0	1	2	0	3
4.5	- 5	0	0	0	0	0	0	2	0	2
5	- 5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	- 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	- 6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	- 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		3	118	858	363	699	653	224	2	2920

Tabla 1: Distribución por altura y periodo de ola (año 2009)

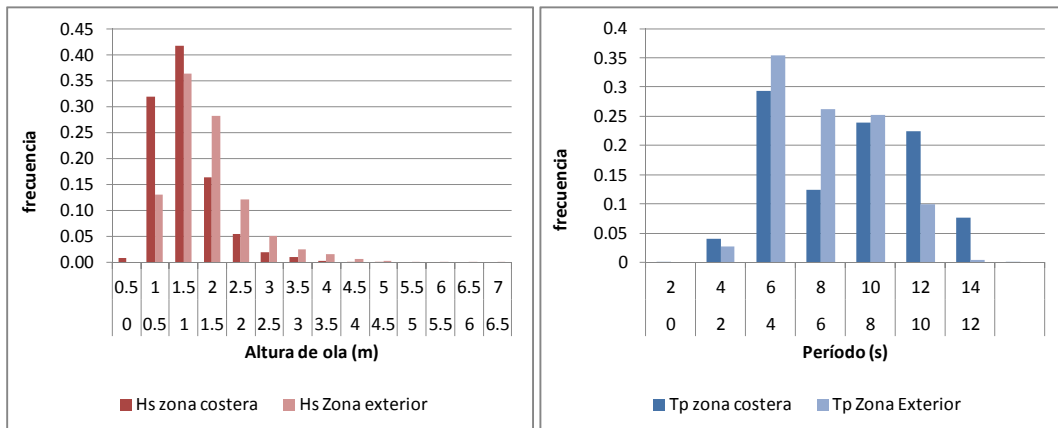


Figura 9: Distribución de frecuencias por altura de ola (izquierda) por período pico de ola (derecha)

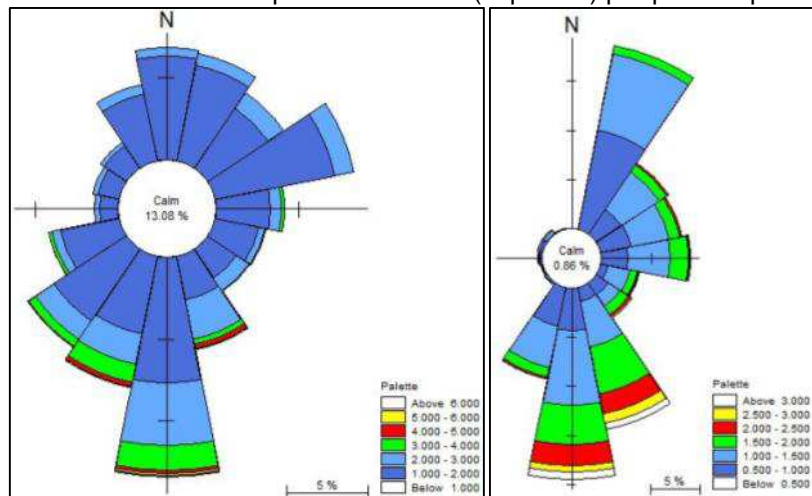


Figura 10: Rosa de altura de olas totales en zona oceánica (izquierda) y altura de olas transformadas a la zona costera (derecha)

CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN DEL MODELO MORFOLÓGICO

Se realizó una simulación morfológica con una serie de tiempo correspondiente al año 2009. En la Figura 11 se presentan los perfiles de control utilizados para evaluar la evolución del banco de arena, y en las Figuras 12 y 13 se contrastan las variaciones del fondo calculadas y las medidas en los relevamientos del 14 de abril, 5 de agosto, y 21 de diciembre. En la Figura 14 se presenta una curva de correlación entre valores medidos y calculados de la cota de fondo.

En la curva de correlación de la Figura 14 puede observarse un coeficiente de regresión próximo a 1. No obstante, existen algunos puntos donde los valores absolutos difieren entre 0.5 a 1.5 m (2 a 5 pies). Si bien la correlación general puede considerarse como aceptable para un cálculo de transporte de sedimentos y cambios morfológicos de todo el banco, estas diferencias para fines náuticos implican variaciones significativas en la capacidad de carga de las embarcaciones.

Los errores en la correlación pueden tener diversos orígenes. En primer lugar el clima de olas utilizado en las simulaciones proviene de un *Modelo Global de Oleaje*, que si bien se encuentran calibrado por diferentes métodos, no posee valores medidos directamente en la zona de estudio. En segunda instancia, el relevamiento utilizado tiene una baja densidad de puntos ya que su objetivo es el control de profundidades con fines náuticos. En la actualidad existen métodos mucho más avanzados como las sondas multi-haz que permiten una mayor densidad de puntos en el relevamiento, y permiten detectar la existencia o no de formas de fondo, las cuales afectan el cálculo morfológico.

Por otra parte, cabe mencionar que durante el segundo semestre de 2009, se realizaron dragados en el acceso al Puerto de Mar del Plata. Este dragado se observa en la Figura 13, donde los valores sondeados difieren en gran medida con el perfil calculado en la zona del canal alternativo. Esta intervención sobre el banco, no afecta los resultados del presente estudio, ya que se realizaron sobre sectores localizados en el canal de acceso.

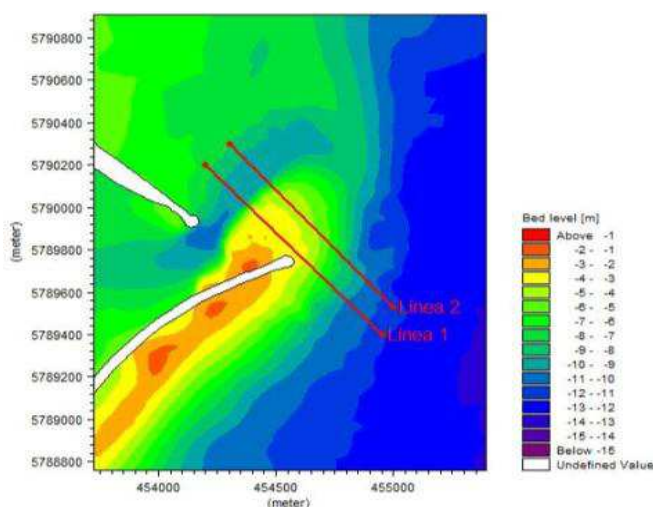


Figura 11: Líneas de control para las simulaciones realizadas con MIKE 21 Coupled Model FM (Coordenadas UTM)

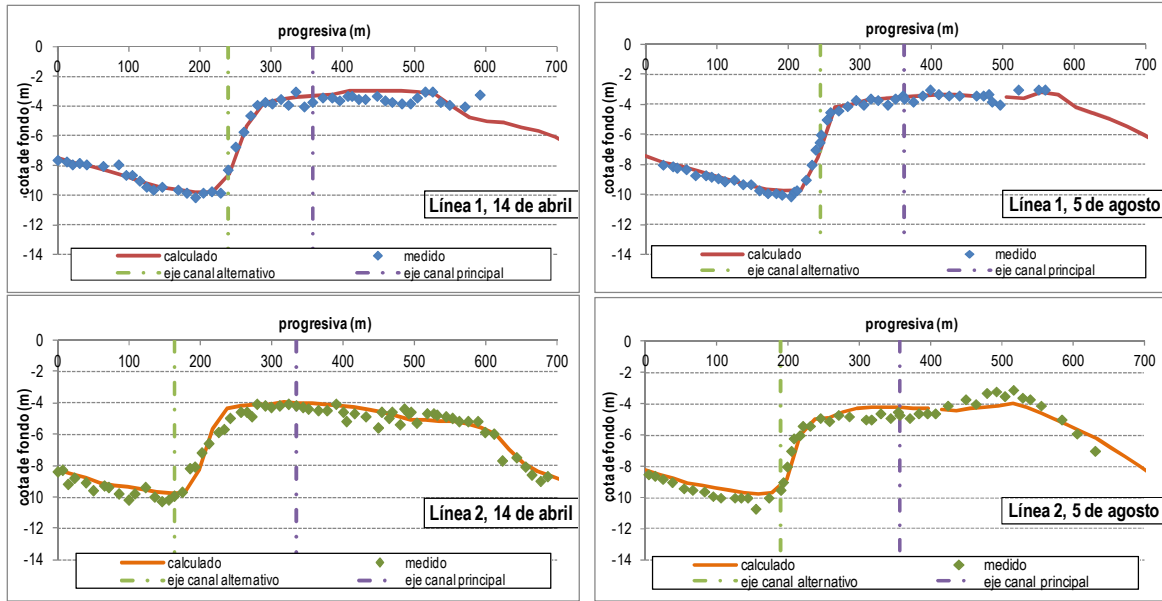


Figura 12: Perfiles del banco de arena calculados con el modelo matemático y valores medidos en los relevamientos del 14 de abril y 5 de agosto de 2009

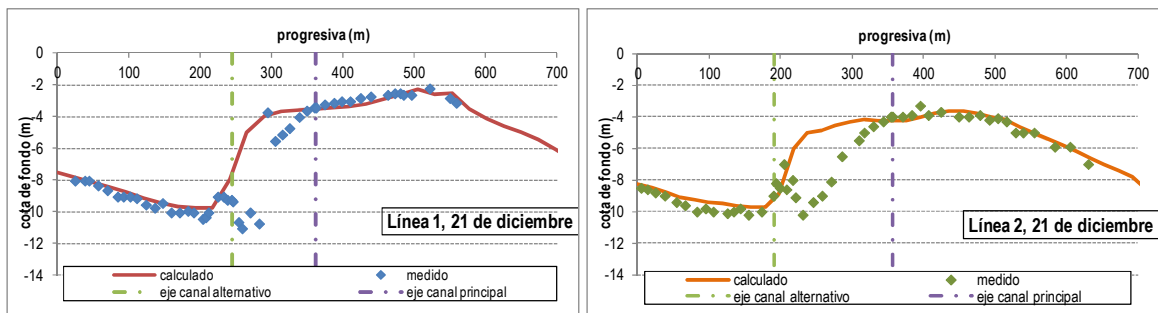


Figura 13: Perfiles del banco de arena calculados con el modelo matemático y valores medidos en el relevamiento del 21 de diciembre de 2009

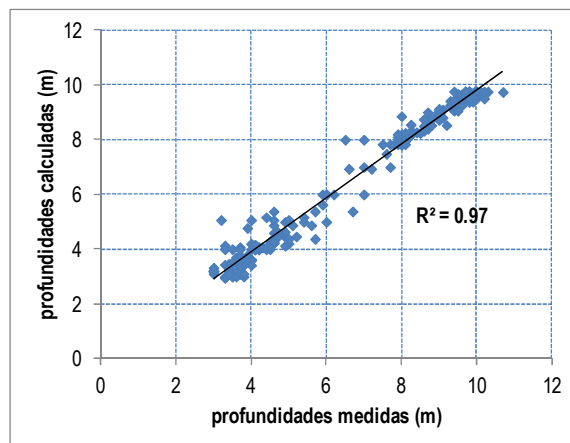


Figura 14: Correlaciones entre valores medidos y calculados para el 14 de abril, 5 de agosto y 21 de diciembre de 2009. Banco de arena y Canal de Acceso al Puerto de Mar del Plata.

DINÁMICA LITORAL EN EL ENTORNO DE LA ESCOLLERA SUR

En cuanto al comportamiento hidrodinámico de la zona de estudio, se muestran en las Figuras 15 y 16 los campos de corrientes y olas para una condición de oleaje en condición de tormenta frecuente del SSE. Se observan corrientes paralelas al exterior de la Escollera Sur con velocidades mayores a 1 m/s. Dichas

corrientes disminuyen en la zona del morro (0.2 a 0.4 m/s), y se presentan recirculaciones en el acceso al puerto debido a gradientes de olas (por difracción) y de niveles (*set-up* interior y exterior). Tal como se ha analizado por otros investigadores (Mangor y Fuchs, 1999), este proceso hidrodinámico de separación de la corriente es el principal mecanismo responsable de la sedimentación en el acceso al puerto.

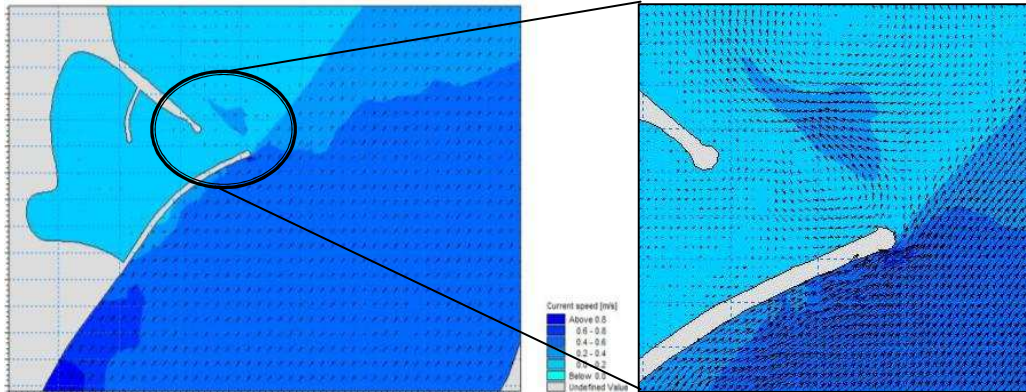


Figura 15: Campo de corrientes para una condición de oleaje en condición de tormenta frecuente del SSE ($H_s = 2.5$, $T_p = 9$)

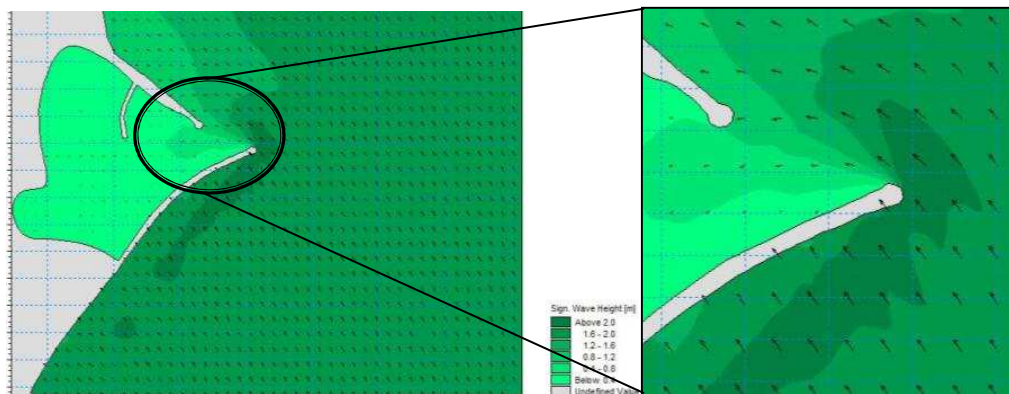


Figura 16: Campo de olas para una condición de oleaje en condición de tormenta frecuente del SSE ($H_s = 2.7$ m, $T_p = 9$ s)

Para un escenario similar al anterior, pero con olas del SE, la rotura sobre el banco provoca corrientes intensas hacia el Norte (mayores a 1 m/s), y luego una disminución de velocidades en el canal de acceso alternativo (enfiliación 208^o).

Para condiciones de olas frecuentes desde el sector SSE – S, entre 1 a 1.5 m y períodos de 6 a 8 s, las corrientes no superan los 0.6 m/s dependiendo del nivel de mar y la condición de rompientes. Asimismo, para oleaje proveniente del sector N – NE, donde frecuentemente se presentan olas del orden de 1 a 1.5 m y período de 5 a 7 s, las mayores corrientes circulan paralelas al lado interno de la Escollera Sur, y no superan los 0.8 m/s aproximadamente. Los cambios morfológicos observados en el banco de arena para las condiciones frecuentes si bien no son significativos, movilizan el sedimento a posiciones cercanas al morro de la Escollera Sur, y luego ante una condición de tormenta son movilizados sobre el banco y el canal de acceso. Cabe mencionar que el modelo

hidrodinámico no fue calibrado directamente, con lo cual los valores de velocidad indicados anteriormente deben tomarse como órdenes de magnitud.

En cuanto a cambios morfológicos, entre el 23 y 25 de julio de 2009 se presentó un temporal con alturas de ola máximas en el exterior del orden de los 4 m (en una profundidad de 20 m) y períodos de 10 segundos. Esto provocó modificaciones en el banco de arena, observándose zonas de erosión en su parte frontal y superior (color azul de la Figura 17), y aumento de los depósitos próximos al canal de acceso alternativo (en color rojo de la Figura 17).

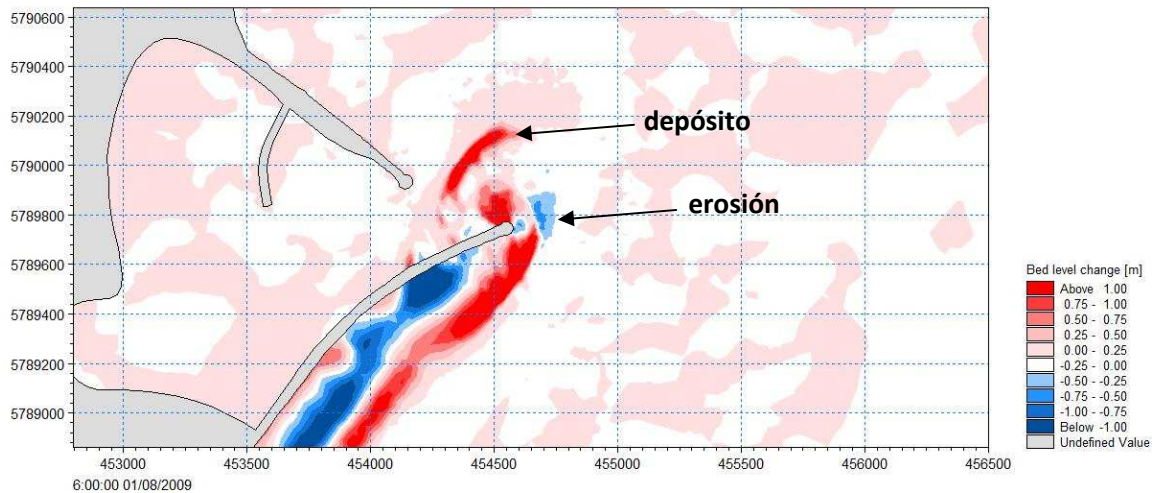


Figura 17: Cambios relativos del nivel de fondo al 1 de agosto de 2009. Escollera Sur del Puerto de Mar del Plata

Tal como se mencionó en la metodología del presente trabajo, la zona litoral activa se extiende hasta 7.3 m, según el cálculo realizado con el modelo de Hallermeier (1981). Los cambios morfológicos observados a lo largo del año 2009 se produjeron en profundidades de hasta 9 a 10 m, considerando que el límite de la zona activa se produce cuando las variaciones del fondo son del orden de 6 cm (Nicholls et al., 1998), lo que implica una diferencia del 20 % con las predicciones de Hallermeier (1981). Asimismo, la modificación de la línea de costa que se ha producido desde la construcción de la Escollera Sur, desplazó la franja denominada “zona activa o litoral” hacia el mar. Esto implica que toda la escollera y boca de acceso al puerto se encuentran dentro de la zona de mayores cambios morfológicos, generando un permanente movimiento de sedimentos, que, dependiendo de las condiciones hidrodinámicas, podrá provocar depósitos o erosiones.

4. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio mediante modelación matemática de la dinámica litoral en el entorno de la Escollera Sur del Puerto de Mar del Plata. Luego de la calibración/validación del modelo morfológico, se analizó el comportamiento de los sedimentos en el acceso al puerto y el extremo de la escollera. Dicho análisis permite mejorar la comprensión sobre el comportamiento de los sedimentos en la zona de estudio. Asimismo, ante una posible intervención sobre el banco de arena o en el canal de acceso, mediante la herramienta implementada se podrían prever las zonas de erosión y sedimentación.

5. REFERENCIAS

- Becerini, H. y Marengo, N. 2002. "Historia del Puerto de Mar del Plata y de sus hombres". Disponible en: <http://www.imagenesmardelplata.com.ar>
- Bertola G. R., 2006. Morfodinámica de las playas del sudeste de la Provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *Latin American Journal of sedimentology and basin analysis*. Vol.13: 31-57.
- Brøker, I., Zyserman, J., Madsen, E.Ø., Mangor, K. and Jensen, J., 2007. MORPHOLOGICAL MODELLING. A tool for optimization of coastal structures. *Journal of Coastal Research*, Vol. 23, Issue 5, Sept. 2007, pp 1148-1158
- Caviglia, F. J., Pousa, J. L. y Lanfredi, N. W., 1992. Transporte de sedimentos: una alternativa de cálculo. II Congreso de Ciencias de la Tierra, Memorias, Santiago, Chile, 413-422.
- Coastal Engineering Research Center, 1984. Shore protection manual volume 1. US Army Corps of Engineers
- Coastal Engineering Research Center, 1998. Engineering and Design – Coastal Engineering Manual, Part III (Chapter 2: Longshore Sediment Transport). Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers (nº EC 1110-2-292).
- Danish Hydraulic Institute, 2011a. MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM. Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. DHI Group, Horshølm.
- Danish Hydraulic Institute, 2011b. MIKE 21 Spectral Wave Module. Scientific Documentation. DHI Group, Horshølm.
- Danish Hydraulic Institute, 2011c. Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves. LITSTP USER GUIDE. DHI Group, Horshølm.
- Engelund, F. and Fredsøe, J., 1976. A sediment transport model for straight alluvial channels, *Nordic Hydrology*, 7, pp. 296-306.
- Fredsøe, J., 1984. Turbulent boundary layers in wave–current motion. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE 110 (HY8), 1103–1120.
- Fundación Histarmar, 2012. Historia del Puerto de Mar del Plata. <http://www.histarmar.com.ar>
- Hallermeier, R.J., 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate, *Coastal Engineering*, 4, 253-277.
- Isla, F. I., 2006. Erosión y defensa costeras. En Isla, F. I y Lasta, C. A. (eds.) *Manual de Manejo costero para la Provincia de Buenos Aires*, EUDEM, Mar del Plata, 125-147.
- Mangor, K. y Fuchs, J., 1999. Optimization of port layout with respect to sedimentation, coastal impact, mooring conditions and navigation. COPEDEC V, Cape Town.
- Mangor, K.; Brøker, I.; Deigaard, R. y Grunnet, N. 2010. Bypass harbours at littoral transport coasts. PIANC MMX Congress Liverpool UK.
- Nicholls, R. J.; Larson, M.; Capobianco, M. y Birkemeier, W. 1998. Depth of closure: Improving understanding and prediction. *Coastal Engineering*, 2888 - 2901.
- Perillo, G.M.E., 2003. Dinámica del Transporte de Sedimentos. Asociación Argentina de Sedimentología, Publicación Especial Nro. 2, La Plata, 201 pp. ISBN 987-96296-1-2.
- Servicio de Hidrografía Naval, 1975. Carta Náutica H 250, "Rada Mar del Plata", escala 1:50.000.