Aporte de los modelos globales, regionales y locales en el manejo costero. Caso práctico de aplicación en la localidad de Mar del Tuyú.

Leonardo S. Peralta, Carlos A. Haspert, Federico Haspert

Instituto Nacional del Agua – Laboratorio de Hidráulica – Programa de Hidráulica Marítima.

E-mail: speralta@ina.gob.ar / chaspert@ina.gob.ar / fhaspert@gmail.com

RESUMEN

Se presenta en este trabajo la aplicación del modelo de propagación de oleaje espectral SWAN que permite simular la energía contenida en las ondas en su propagación regional desde superficies oceánicas hasta zonas costeras. Se aplica el mismo a un caso práctico en la localidad de Mar del Tuyú.

El objetivo es minimizar el proceso de erosión costera, que puede poner en riesgo la principal actividad económica del lugar: el turismo. Mediante el empleo del modelo, se pretende obtener los valores extremos de ola en la zona, para proponer y evaluar una obra de defensa que detenga la erosión costera, ya que la misma constituye una seria amenaza para el desarrollo sostenible de dicha localidad.

Para tal fin, se ha recopilado y evaluado información de olas en aguas profundas y vientos proveniente de modelos globales, y así definir condiciones extremas para determinar escenarios de cálculo. Por su parte, utilizando información cartográfica para describir la batimetría en el área, se genera un modelo digital de elevación del terreno sobre el que se aplica el modelo numérico, utilizando como forzante el campo de vientos que actúa sobre la superficie libre. Se han considerado dos situaciones diferentes: la situación actual de playa sin ningún tipo de protección artificial, y una configuración para la obra de protección consistente en un conjunto de rompeolas de cinco unidades.

Como producto de las metodologías descriptas y por medio de la interacción con sistemas de información geográfica (SIG) y planillas de cálculo, se obtienen los resultados en proximidades a la costa de Mar del Tuyú.

En función del conjunto de escenarios analizados puede establecerse que es esperable que la presencia de un sistema de rompeolas en la zona de estudio produzca una importante reducción de las alturas de olas que se propagan hasta la costa.

INTRODUCCIÓN

La costa atlántica de la Provincia de Buenos Aires presenta en la actualidad numerosas problemáticas ambientales (entre ellas la erosión costera) derivadas principalmente del proceso de organización y ocupación territorial que ha sido llevado a cabo contemporáneamente al desarrollo y al creciente aumento de la explotación turística en nuestro país (Fragilidad de los espacios litorales. Lineamientos para comprender la erosión costera inducida en el litoral marítimo bonaerense. El caso de la localidad de Mar del Tuyú).

La erosión costera constituye un problema ambiental grave en la localidad de Mar del Tuyú, que puede poner en riesgo la principal actividad económica del lugar: el turismo.

Si bien las causas pueden ser de origen natural, como las asociadas con cambios climáticos y variaciones en el nivel del mar, éstas han sido potenciadas por el accionar del hombre.

Como ha ocurrido con la mayoría de las localidades del Partido de La Costa, el proceso de urbanización se llevó a cabo sin una gestión que considere la importancia y vulnerabilidad del recurso playa (Figura 1).

Figura 1.- Izquierda: colapso de parte de una vivienda en Mar del Tuyú (Fuente: López, R.A., Marcomini, S.C., 2007). Derecha: erosión causada por la descarga de agua de lluvia en el área de playa (Fuente: López, R.A., Marcomini, S.C., 2008).

Con el objeto de abordar esta problemática urbano-ambiental en Mar del Tuyú, en este trabajo se aplicaron técnicas de modelación matemática para analizar la situación actual, proponer una obra de defensa costera, y evaluar su comportamiento (Haspert, Carlos A., tesis de Licenciatura en Gestión Ambiental Urbana).

OBJETIVOS

- Minimizar la erosión costera en Mar del Tuyú.
- Recuperar la zona costera dañada.
- Proteger los bienes (viviendas particulares, estructuras turísticas, etc.).
- Preservar la actividad turística, base económica del lugar.
- Promover el desarrollo sostenible de la localidad.

HIPÓTESIS

- El cambio climático y el aumento en el nivel del mar han producido un importante retroceso de la línea de costa en Mar del Tuyú.
- En la zona de Mar del Tuyu las alteraciones de origen antrópico han generado un aumento de vulnerabilidad costera que ha potenciado el proceso de erosión significativamente y que se visualiza en el retroceso de la línea de costa y la pérdida de volumen de arena que compone la playa.
- La construcción de estructuras de defensa permitirá detener el avance del proceso de erosión y favorecerá la recuperación de la línea de playa.

METODOLOGÍA

Ante la falta de datos de mediciones directas y de largo plazo en el frente costero de Mar del Tuyú que permitan la caracterización de las distintas variables del oleaje necesarias para proyectar la obra de defensa contra la erosión de sus playas, se recurrió a datos de modelos globales y modelaciones a escala local o regional (SWAN). Las diferentes etapas abordadas para la realización del trabajo fueron las siguientes:

- Recopilación de información.
- Evaluación de olas en aguas profundas (23 años).
- Evaluación de vientos (20 años).
- Definición de condiciones extremas para determinar escenarios de cálculo.
- Aplicación del modelo numérico para propagación de oleaje (sin obra de defensa costera).
- Determinación de valores extremos de ola en Mar del Tuyú.
- Aplicación del modelo numérico para propagación de oleaje (con obra de defensa costera).

DIGITALIZACIÓN DE CARTAS NÁUTICAS

La información batimétrica en el área fue obtenida de cartografía publicada por el Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina. Las cartas náuticas empleadas se citan a continuación:

- Carta H-1: Acceso al Río de la Plata. Escala 1:1.500.000.
- Carta H-101: De Cabo Polonio a Cabo Corrientes. Escala 1:500.000.
- Carta H-113: Río de la Plata Exterior. Escala 1:250.000.
- Carta H-114: De Faro San Antonio a Faro Miramar. Escala 1:250.000.
- Carta H-116: Río de la Plata Medio y Superior. Escala 1:250.000.

En la Figura 2 se presenta la cobertura batimétrica y la ubicación de los puntos considerados para evaluar información relativa a olas y vientos.

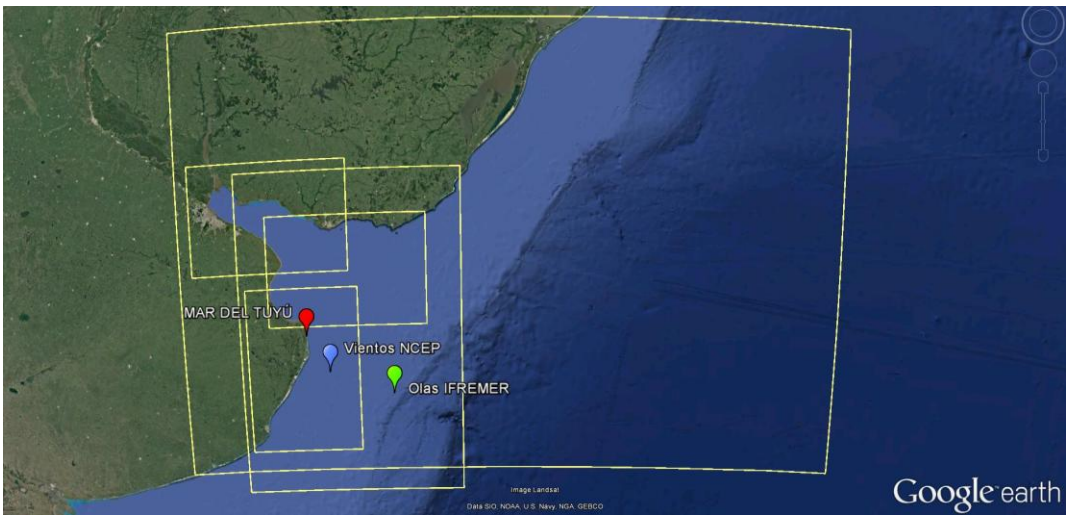

Figura 2.- Cobertura de la cartografía de base empleada y ubicación de los puntos de interés.

Los 47.474 puntos digitalizados fueron geo-referenciados en el sistema de coordenadas planas UTM zona 21 Sur, y almacenados en un archivo XYZ. Este fichero fue utilizado para generar un modelo digital de elevación del terreno, por medio del cual se construyeron las diferentes grillas de cálculo sobre las que "corrió" el modelo matemático. Las profundidades del lecho están expresadas en metros, y referidas al límite inferior de la media de todas las bajamares.

NIVEL DEL MAR

Los datos de marea más próximos a la zona de estudio corresponden a la vecina localidad de Santa Teresita, y se muestran en la Figura 3.

SANTA TERESITA

Carta argentina: H-114

Lat.: 36º 32' S Long.: 56º 40' W

Huso Horario + 3

Régimen de marea: Mixto preponderantemente semidiurno.

Establecimiento de puerto medio: VIII^{h} 17^{min}

Nivel medio: 0,91 m

Las alturas están están en metros y referidas al plano de reducción que pasa 0,91 m debajo del nivel medio.

Alturas en metros sobre el plano de reducción, correspondientes a la predicción 2015				Amplitud	
Pleamar		Bajamar			
Máxima	Media	Más baja	Media	Máxima	Media
1,84	1,32	0,03	0,48	1,54	0,84

Figura 3.- Nivel del mar.

La información fue obtenida por medio de Tablas de Marea que publica el Servicio de Hidrografía Naval de la República Argentina a través de su página web (http://www.hidro.gov.ar/).

DATOS DE OLA

Se ha recopilado y evaluado información de olas proveniente de la base de datos del Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar - IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer), la cual es una institución oceanográfica que en el marco del proyecto IOWAGA-IFREMER provee el acceso a datos de olas a escala planetaria provenientes de un modelo global llamado WaveWatch III (WW3) que ha sido ajustado para su implementación. El resultado es un conjunto de datos distribuidos sobre una grilla global con una resolución espacial de 0.5° en latitud y longitud, y una resolución temporal de 3 horas. Se trata de una base pública y de libre acceso, cuyos datos pueden descargarse desde la siguiente dirección:

ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wavewatch3/HINDCAST/

Para este trabajo, se llevó a cabo un análisis estadístico correspondiente al período 1990-2012 (23 años) en un nodo ubicado en las coordenadas 37°30'0.00"S; 55° 0'0.00"O, a unos 182 km de la costa de Mar del Tuyú. En dicho análisis se evaluó la distribución de frecuencias de altura significativa, período y dirección del oleaje, y las alturas de ola para cada dirección, sobre una rosa de olas de 16 sectores, espaciada 22.5° (Figura 4).

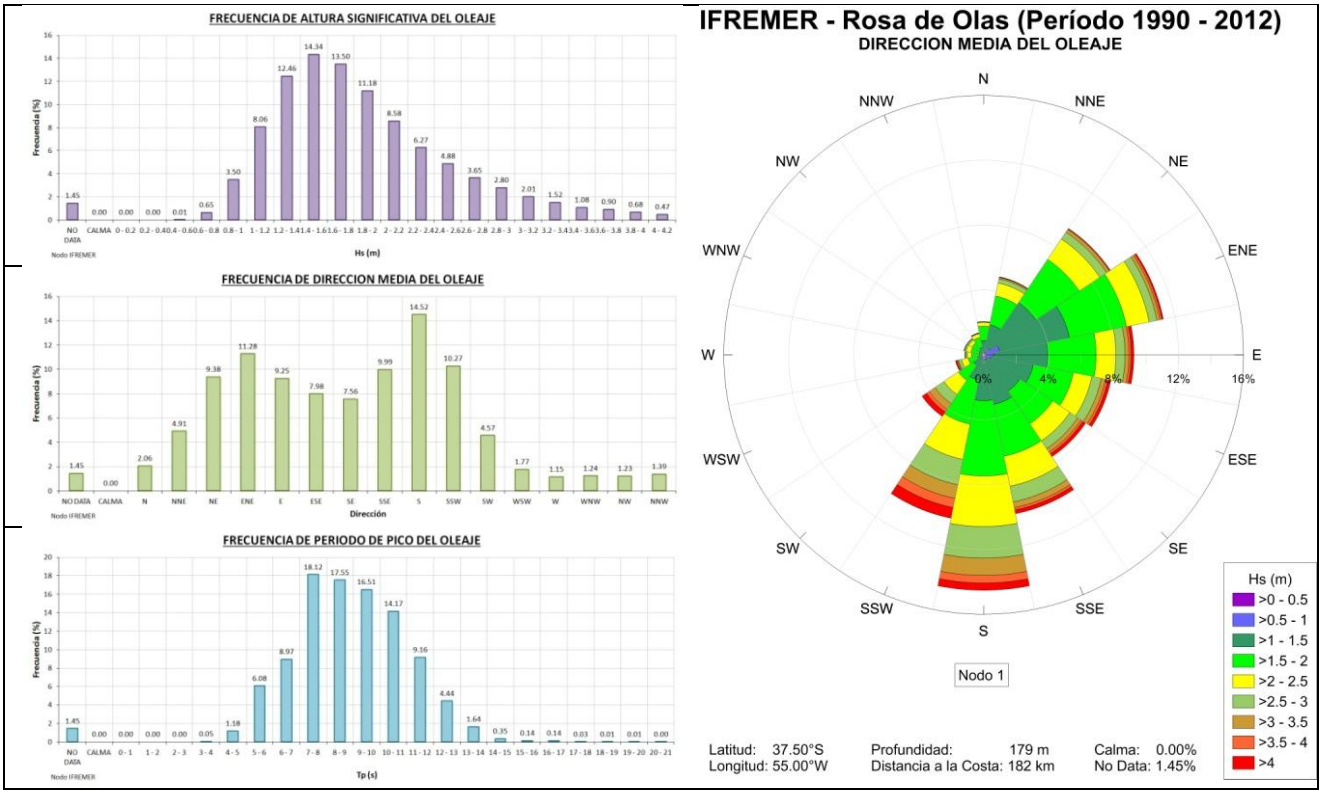

Figura 4.- Distribución porcentual de altura, dirección y período del oleaje – Rosa de olas.

DATOS DE VIENTO

Se ha recopilado y evaluado información de vientos proveniente de la base de datos del NCEP/NCAR (Kalnay et *al*, 1996).

- NCEP: Centros Nacionales de Predicción Ambiental (National Centers for Environmental Prediction) dependiente de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica - NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).
- NCAR: Centro Nacional de Investigación Atmosférica (National Center for Atmospheric Research).

La información contenida en esta base de datos no corresponde a observaciones directas, sino que son el resultado de un análisis en el que se combinan las distintas metodologías de observación y modelos numéricos. El resultado es un conjunto de datos distribuidos sobre una grilla global con una resolución espacial de 1.875° en longitud, 1.902° en latitud, y una resolución temporal de 6 horas. Se trata de una base pública y de libre acceso, cuyos datos pueden descargarse desde la siguiente dirección:

http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html

Para este trabajo, se llevó a cabo un análisis estadístico correspondiente al período 1996-2015 (20 años) en un nodo ubicado en las coordenadas 37° 8'31.92"S; 56°15'0.00"O, a unos 74 km de la costa de Mar del Tuyú. En dicho análisis se evaluó la distribución de frecuencias, y las velocidades medias y máximas anuales para cada dirección, sobre una rosa de vientos de 16 sectores, espaciada 22.5° (Figura 5).

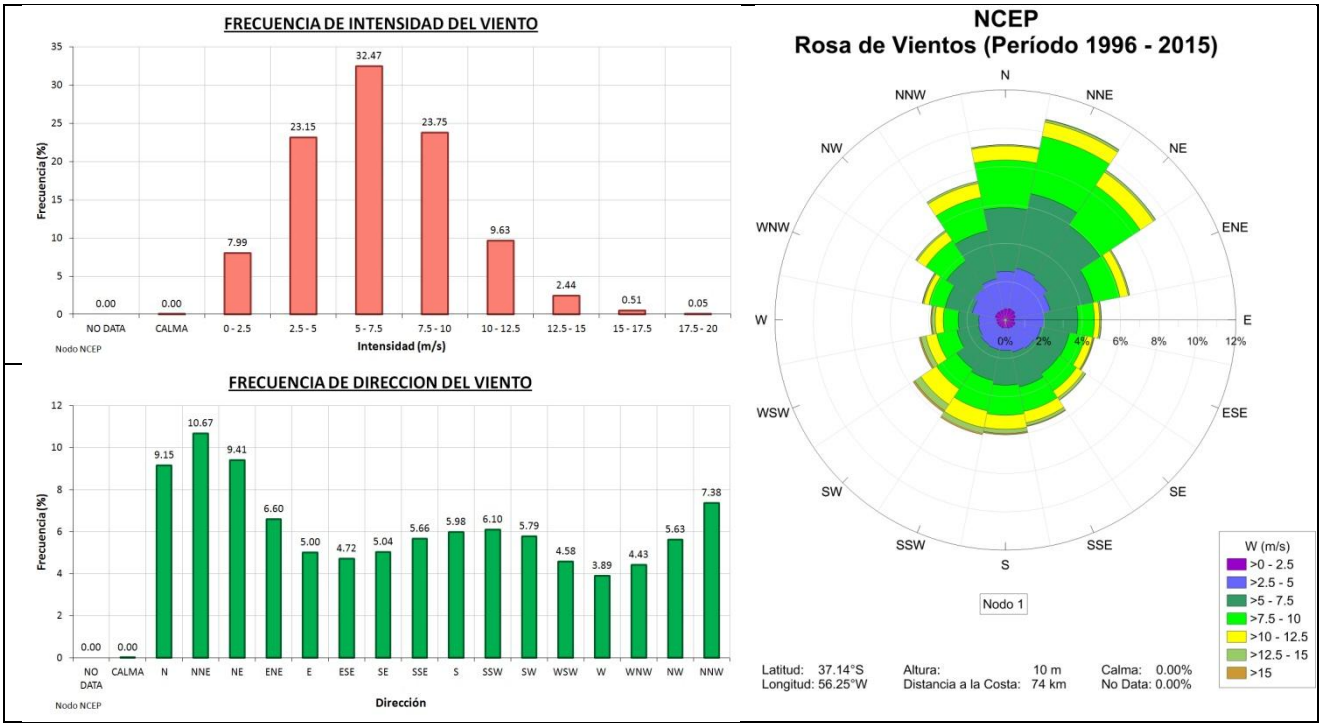

Figura 5.- Distribución porcentual de casos por intervalos de intensidad y dirección – Rosa de vientos.

Tabla 1.- Distribución porcentual de casos por intervalos de intensidad y dirección.

Cuenta de Ø	Ø (sector)																	
W (m/s)	CALMA	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Totales Ø
0-2.5	0.00%	0.54%	0.61%	0.59%	0.53%	0.43%	0.52%	0.48%	0.44%	0.40%	0.43%	0.42%	0.43%	0.44%	0.53%	0.54%	0.51%	7.84%
2.5-5	0.00%	1.97%	2.12%	2.00%	1.84%	1.55%	1.35%	1.30%	1.25%	1.17%	1.14%	1.11%	0.99%	0.94%	1.21%	1.44%	1.66%	23.03%
5-7.5	0.00%	3.32%	3.97%	3.32%	2.30%	1.78%	1.53%	1.57%	1.85%	1.80%	1.64%	1.51%	1.14%	1.08%	1.44%	1.71%	2.56%	32.52%
7.5-10	0.00%	2.51%	3.06%	2.53%	1.41%	0.87%	0.83%	1.09%	1.31%	1.58%	1.61%	1.28%	1.08%	0.78%	0.87%	1.29%	1.79%	23.89%
10-12.5	0.00%	0.74%	0.76%	0.84%	0.43%	0.27%	0.40%	0.43%	0.61%	0.74%	0.91%	0.98%	0.56%	0.42%	0.27%	0.55%	0.75%	9.66%
12.5-15	0.00%	0.07%	0.12%	0.12%	0.08%	0.08%	0.06%	0.15%	0.16%	0.23%	0.28%	0.39%	0.28%	0.17%	0.07%	0.10%	0.11%	2.47%
15-17.5	0.00%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.01%	0.03%	0.01%	0.03%	0.06%	0.08%	0.09%	0.08%	0.06%	0.02%	0.00%	0.00%	0.51%
17.5-20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%
20-22.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
Totales Ø	**0.00%**	**9.15%**	**10.67%**	**9.41%**	**6.60%**	**5.00%**	**4.72%**	**5.04%**	**5.66%**	**5.98%**	**6.10%**	**5.79%**	**4.58%**	**3.89%**	**4.43%**	**5.63%**	**7.38%**	**100.00%**

Tabla 2.- Valores máximos anuales por dirección.

Máx de W (m/s)	Ø (sector)																	
Año	CALMA	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Totales
1996		13.28	13.28	14.15	13.82	13.34	15.34	13.00	15.06	15.80	16.15	13.56	13.68	14.12	12.79	10.85	13.56	16.15
1997		11.91	11.61	13.23	14.14	12.83	13.74	10.49	11.06	10.42	18.29	17.47	16.39	15.95	12.54	10.47	12.43	18.29
1998		11.81	11.81	13.88	12.98	14.37	16.40	14.87	14.88	16.11	19.07	16.71	15.91	17.23	11.63	11.78	12.47	19.07
1999		16.48	16.24	17.54	12.74	14.17	14.22	12.81	13.62	16.12	13.85	12.92	15.32	13.20	12.06	15.16	11.54	17.54
2000		12.98	14.09	11.75	11.31	16.24	20.89	18.68	15.73	13.83	14.45	13.64	13.09	14.50	12.87	12.40	11.94	20.89
2001		11.70	12.43	13.07	20.24	19.00	16.92	16.41	14.96	15.32	17.55	15.76	14.62	16.40	16.37	12.31	12.90	20.24
2002		11.90	13.29	14.10	11.70	11.23	15.02	13.21	13.72	15.33	15.85	19.73	16.77	17.41	13.09	12.60	12.71	19.73
2003		13.31	13.98	13.93	10.63	13.00	14.73	18.16	13.10	12.88	16.26	16.84	16.10	15.00	11.07	14.34	13.32	18.16
2004		13.01	14.36	14.52	14.53	12.46	13.37	14.87	15.79	13.01	14.04	14.19	16.19	12.91	14.14	13.58	13.07	16.19
2005		10.42	12.51	11.15	10.24	14.30	10.47	12.17	14.81	18.30	18.87	14.79	15.56	17.46	13.02	12.31	11.94	18.87
2006		14.21	15.77	12.67	11.12	12.90	11.99	13.93	12.47	14.41	17.14	14.60	14.37	10.82	15.87	12.81	12.32	17.14
2007		13.41	12.81	12.05	10.20	11.41	11.24	12.87	11.77	15.21	16.32	13.52	14.76	14.62	11.11	12.09	13.48	16.32
2008		12.46	14.27	14.22	12.24	12.69	12.18	14.31	17.46	12.70	15.40	13.92	14.87	14.52	11.88	13.76	12.75	17.46
2009		15.83	13.87	13.46	13.85	10.57	13.39	16.51	15.18	14.71	13.07	17.73	17.34	16.28	17.96	13.67	13.45	17.96
2010		12.24	12.91	12.62	14.81	15.41	12.01	11.24	13.61	16.47	13.93	14.92	14.99	15.57	14.39	11.83	14.09	16.47
2011		13.14	15.00	14.97	12.82	14.02	11.85	11.67	12.80	17.18	13.40	15.42	15.89	12.22	12.67	13.42	13.69	17.18
2012		13.09	13.67	13.54	12.65	9.21	10.82	14.15	14.34	13.30	15.64	14.90	17.04	14.14	12.28	13.41	13.73	17.04
2013		12.50	14.26	13.96	12.45	11.05	10.19	13.72	17.23	16.00	15.65	16.83	15.34	14.38	16.25	14.20	14.20	17.23
2014	0.00	12.00	17.46	16.40	13.24	13.75	12.08	11.42	13.02	15.06	16.86	17.17	17.43	15.44	13.64	14.74	15.66	17.46
2015		11.81	15.29	13.44	12.22	11.67	12.54	14.08	11.03	12.34	15.28	17.56	16.42	17.00	15.61	12.12	14.10	17.56
Totales	**0.00**	**16.48**	**17.46**	**17.54**	**20.24**	**19.00**	**20.89**	**18.68**	**17.46**	**18.30**	**19.07**	**19.73**	**17.43**	**17.46**	**17.96**	**15.16**	**15.66**	**20.89**

Se consideraron 9 direcciones que pueden tener influencia sobre el área del proyecto (Figura 6).

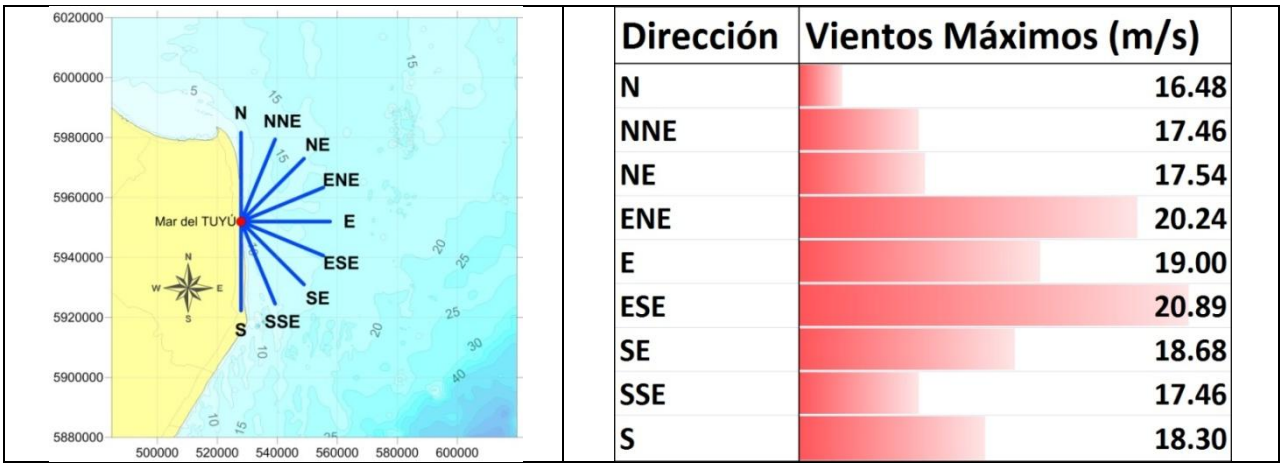

Figura 6.- Direcciones a considerar – Vientos máximos por dirección (20 años).

Los resultados de este análisis permitieron establecer condiciones medias y extremas de intensidad del viento para las distintas direcciones de incidencia, los cuales constituyen la información de base para la obtención de los valores extremos de ola en la zona costera de Mar del Tuyú, mediante el empleo del modelo numérico.

ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS

El propósito de este análisis es la determinación de valores de intensidad del viento asociados a distintos períodos de retorno. Para ello, se evaluó el ajuste de la serie de datos correspondientes al período analizado mediante el método de los valores máximos anuales, utilizando la fórmula de Gringorten:

$$Pi = (i - 0.44) / (N + 0.12) \qquad (1)$$

Este método consiste en elegir tan solo el valor máximo anual de intensidad del viento, para cada una de las direcciones consideradas. Dichos datos se ordenan de mayor a menor y se les asigna un número de orden *i* de forma creciente. *N* representa el número total de eventos. Aplicando la fórmula *1* se obtiene la probabilidad para cada *i*, para luego calcular el período de retorno con la expresión:

$$TR = 1 / Pi \qquad (2)$$

Tabla 3.- Período de retorno (intensidad del viento).

i	W (m/s)									Pi	TR (años)
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S		
1	16.48	17.46	17.54	20.24	19.00	20.89	18.68	17.46	18.30	0.0278	35.93
2	15.83	16.24	16.40	14.81	16.24	16.92	18.16	17.23	17.18	0.0775	12.90
3	14.21	15.77	14.97	14.53	15.41	16.40	16.51	15.79	16.47	0.1272	7.86
4	13.41	15.29	14.52	14.14	14.37	15.34	16.41	15.73	16.12	0.1769	5.65
5	13.31	15.00	14.22	13.85	14.30	15.02	14.87	15.18	16.11	0.2266	4.41
6	13.28	14.36	14.15	13.82	14.17	14.73	14.87	15.06	16.00	0.2763	3.62
7	13.14	14.27	14.10	13.24	14.02	14.22	14.31	14.96	15.80	0.3260	3.07
8	13.09	14.26	13.96	12.98	13.75	13.74	14.15	14.88	15.33	0.3757	2.66
9	13.01	14.09	13.93	12.82	13.34	13.39	14.08	14.81	15.32	0.4254	2.35
10	12.98	13.98	13.88	12.74	13.00	13.37	13.93	14.34	15.21	0.4751	2.10
11	12.50	13.87	13.54	12.65	12.90	12.54	13.72	13.72	15.06	0.5249	1.91
12	12.46	13.67	13.46	12.45	12.83	12.18	13.21	13.62	14.71	0.5746	1.74
13	12.24	13.29	13.44	12.24	12.69	12.08	13.00	13.61	14.41	0.6243	1.60
14	12.00	13.28	13.23	12.22	12.46	12.01	12.87	13.10	13.83	0.6740	1.48
15	11.91	12.91	13.07	11.70	11.67	11.99	12.81	13.02	13.30	0.7237	1.38
16	11.90	12.81	12.67	11.31	11.41	11.85	12.17	12.80	13.01	0.7734	1.29
17	11.81	12.51	12.62	11.12	11.23	11.24	11.67	12.47	12.88	0.8231	1.21
18	11.81	12.43	12.05	10.63	11.05	10.82	11.42	11.77	12.70	0.8728	1.15
19	11.70	11.81	11.75	10.24	10.57	10.47	11.24	11.06	12.34	0.9225	1.08
20	10.42	11.61	11.15	10.20	9.21	10.19	10.49	11.03	10.42	0.9722	1.03

Calculado *TR*, resta obtener la ecuación de la curva de ajuste para cada una de las direcciones consideradas. En la Figura 7 se observa la curva de ajuste para la dirección ESE.

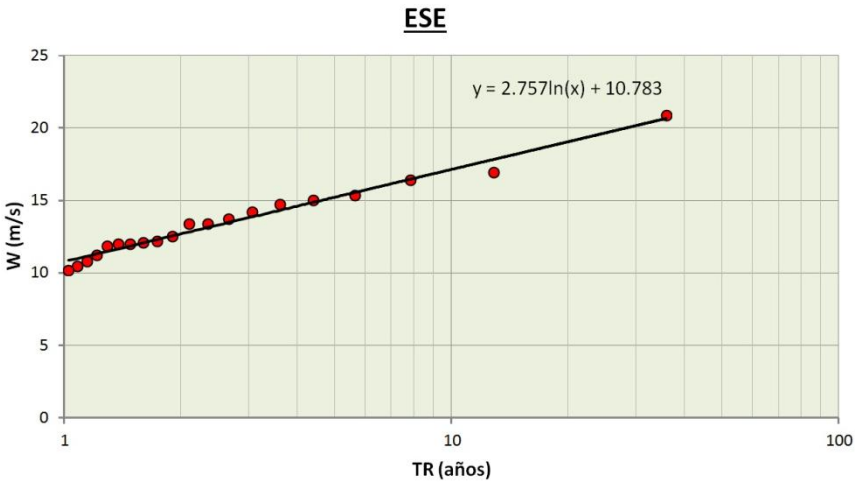

Figura 7.- Curva de ajuste para la dirección ESE.

Tabla 4.- Valores extremos de viento para distintos períodos de retorno, en las 9 direcciones consideradas.

TR (años)	W (m/s)								
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
5	13.80	14.93	14.70	14.33	14.62	15.22	15.39	15.22	15.87
10	14.81	16.01	15.75	15.90	16.19	17.13	16.98	16.46	17.11
20	15.83	17.08	16.80	17.46	17.75	19.04	18.58	17.71	18.36
50	**17.16**	**18.51**	**18.19**	**19.53**	**19.83**	**21.57**	**20.69**	**19.35**	**20.00**
100	18.18	19.58	19.24	21.10	21.39	23.48	22.28	20.59	21.25

En la Tabla 4 se resalta la intensidad del viento que será utilizada para cada una de las corridas del modelo, correspondiente a un período de retorno de 50 años.

MODELACIÓN MATEMÁTICA

Se realizaron las corridas del modelo SWAN considerando dos situaciones diferentes: en primer lugar, la situación actual de playa sin ningún tipo de protección artificial y, en segundo lugar, una configuración para la obra de protección consistente en un conjunto de rompeolas de cinco unidades. Los escenarios de cálculo elegidos surgieron del análisis de valores extremos (Tabla 4, período de retorno de 50 años).

MODELACIÓN SIN OBRA

La implementación del modelo requirió la construcción de tres grillas de cálculo de diferentes dimensiones:

- Grilla 1 (regional): de 352 km x 510 km, de 1000 metros de resolución.
- Grilla 2 (intermedia): de 135 km x 185 km, de 500 metros de resolución.
- Grilla 3 (de detalle): de 15 km x 15 km, de 30 metros de resolución.

Estas grillas, acopladas convenientemente, permitieron propagar las olas desde el punto de pronóstico hasta la zona costera de Mar del Tuyú, obteniendo los resultados de la modelación sobre una región de cálculo con una descripción batimétrica detallada (Figura 8). El acoplamiento de las grillas permite escribir el resultado de las simulaciones realizadas para la Grilla 1 sobre el contorno de la Grilla 2, sirviendo como dato de entrada para la segunda simulación, la cual permite obtener el resultado de la modelación sobre la zona de mayor detalle (SWAN User Manual).

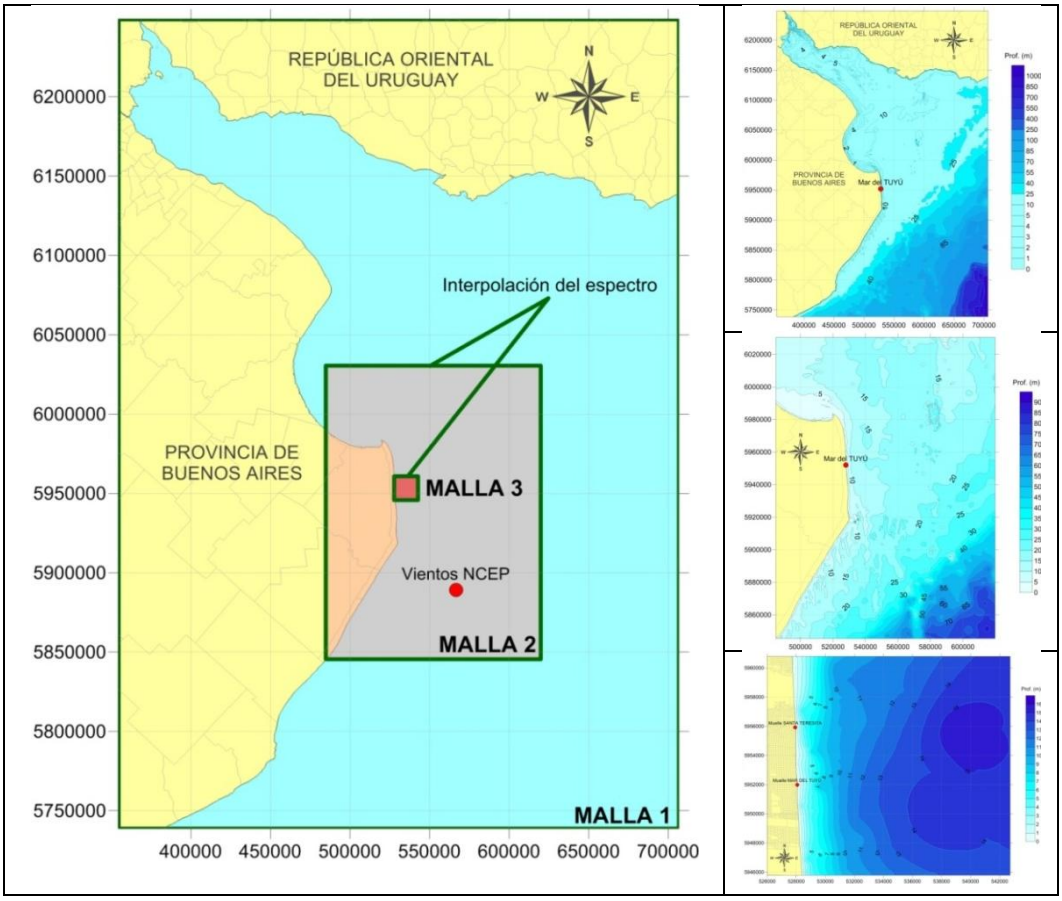

Figura 8.- Posición relativa de las grillas de cálculo para la implementación del modelo numérico SWAN.

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN SIN OBRA DE DEFENSA COSTERA

El resultado de la modelación permite obtener información sobre la altura, período, dirección y demás variables del oleaje en forma directa para cualquier nodo de la grilla de cálculo, o mediante un proceso de interpolación, para cualquier otra posición que se desee especificar dentro del área de estudio.

Con el propósito de facilitar la visualización e interpretación de los resultados, se construyeron gráficos de iso-amplitud de altura de ola para cada una de las simulaciones efectuadas sobre cada malla. En las Figuras 9, 10 y 11, pueden observarse los resultados correspondientes a la dirección ESE. Por otra parte, para poder realizar un análisis más detallado y facilitar la evaluación de los resultados sobre la zona de mayor interés (malla 3) se seleccionaron puntos sobre una "recta de control", los cuales permitieron obtener valores puntuales de altura de ola, período y dirección, entre otras variables. Se calcularon los valores medios de estos parámetros a lo largo de esta "recta de control", y los resultados de las distintas corridas del modelo fueron sintetizados en la Tabla 5.

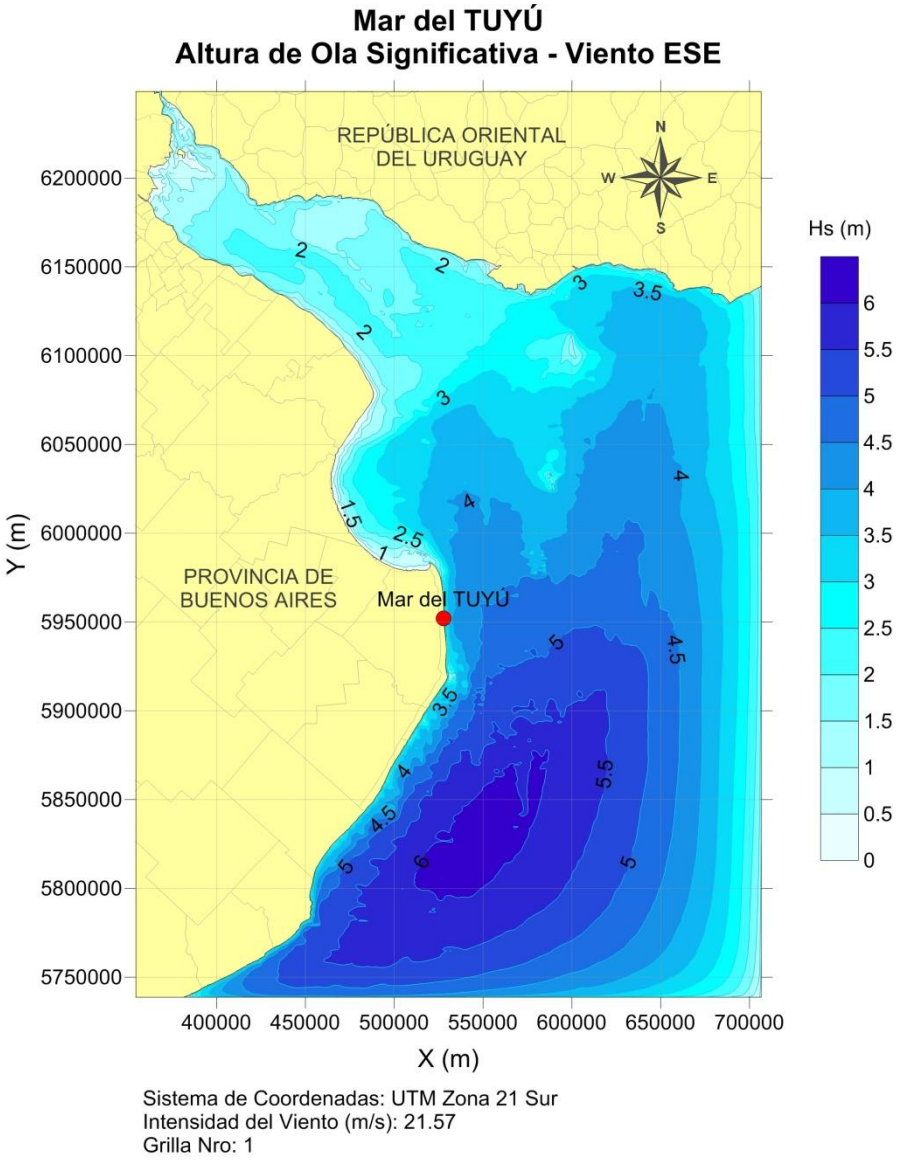

Figura 9.- Curvas de altura de ola para la malla 1, en la dirección ESE.

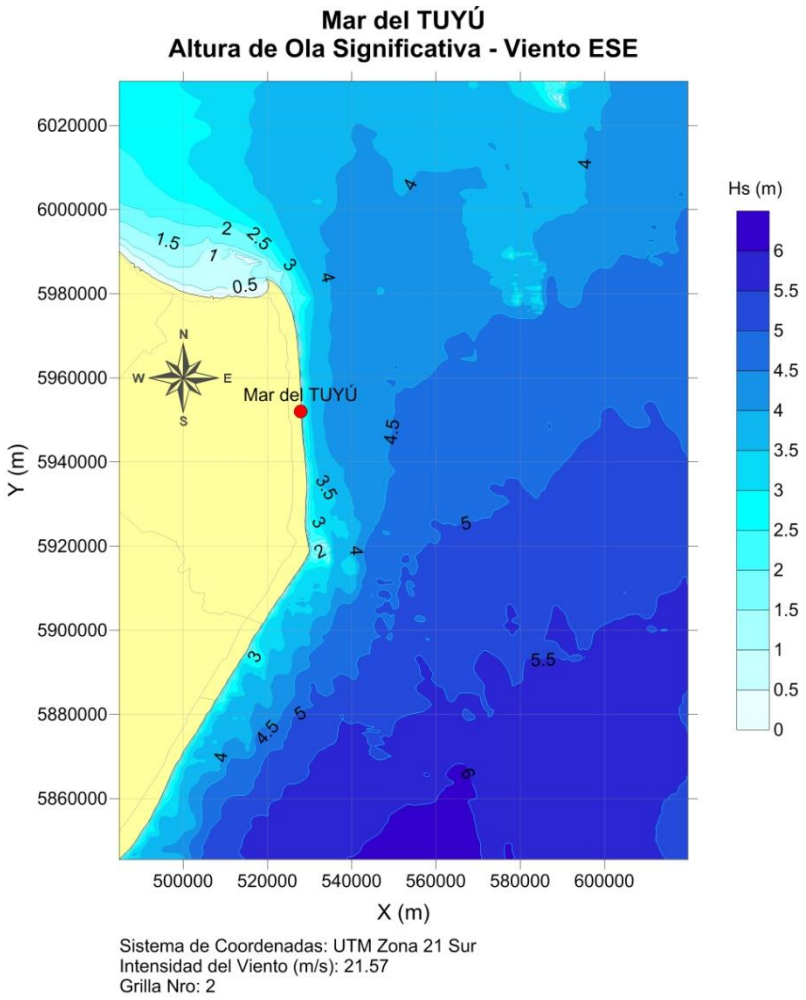

Figura 10.- Curvas de altura de ola para la malla 2, en la dirección ESE.

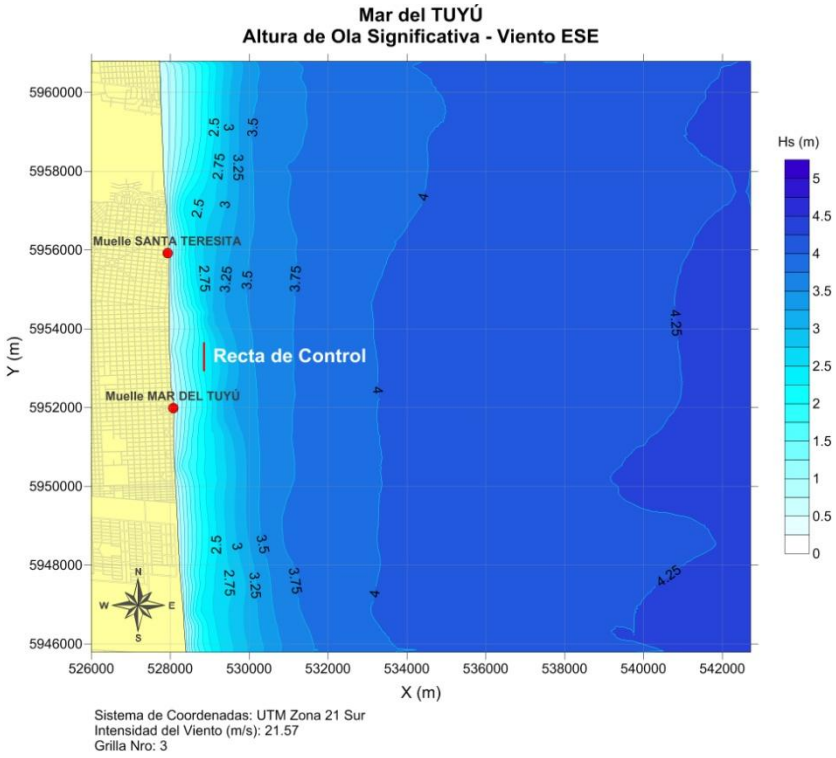

Figura 11.- Curvas de altura de ola para la malla 3, en la dirección ESE.

Tabla 5.- Resultados de la modelación matemática (sin obra de defensa).

Dirección del viento	Altura de ola (m)	Período de ola (seg)	Dirección de ola (grados)	Profundidad (m)
N	1.75	7.01	48.84	4.91
NNE	2.04	7.73	59.63	4.91
NE	2.12	7.73	69.79	4.92
ENE	2.19	7.73	80.92	4.94
E	2.22	8.53	93.16	4.95
ESE	2.23	9.40	102.21	4.96
SE	2.20	9.40	109.90	4.94
SSE	2.13	9.40	117.04	4.92
S	2.05	8.53	124.01	4.91

PROPUESTA DE OBRA DE DEFENSA COSTERA

La obra de protección costera propuesta comprende la construcción de un sistema de cinco rompeolas desvinculados y de baja cresta, para proteger alrededor de 800 metros de playa, con el propósito de atenuar el paso del oleaje y preservar las playas de la erosión sin afectar significativamente sus aspectos estéticos ni recreativos. El esquema de obra se muestra en la Figura 12.

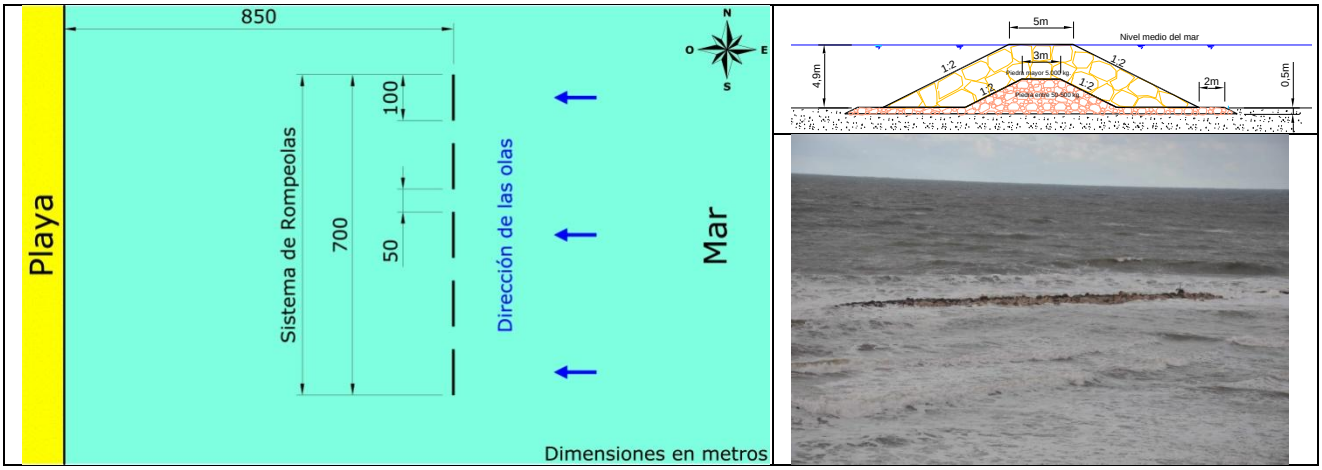

Figura 12.- Esquema de obra – Fotografía de un rompeolas sumergido. Mar del Plata (Fuente: Ing. Sergio Loschacoff).

Dadas las características de la obra, su eficiencia en cuanto al control de la energía del oleaje que se transmite hacia la playa depende fuertemente del nivel del mar respecto de su cota de coronamiento. Por ello, la obra que se propone presenta la particularidad de tener su cota superior en correspondencia con el nivel medio del mar. Su eje longitudinal se encuentra aproximadamente paralelo a la línea de costa, y separado de ésta a una distancia de 850 metros, en correspondencia con la curva de nivel de 4 metros. El conjunto conforma lo que se denomina un sistema de rompeolas aislado de baja cresta, cuya ventaja principal reside en su bajo impacto visual y su menor interferencia con el uso recreativo de la playa.

Los rompeolas de enrocado son las obras más comúnmente utilizadas para la protección de áreas costeras o puertos contra la acción del oleaje. Estas estructuras disipan la energía del oleaje por los procesos de rotura y fricción sobre y en el interior de la estructura. Al volverse las aguas más calmas se facilita la sedimentación. Estas estructuras paralelas a la costa ayudan a reducir la altura de las olas y retener la arena de la playa.

MODELACIÓN CON OBRA DE DEFENSA COSTERA

Se aplicó nuevamente el modelo matemático con el propósito de evaluar las condiciones de oleaje generadas en el área de influencia de los rompeolas, para los distintos escenarios utilizados en el esquema sin obra.

La implementación del modelo requirió definir el área a modelar y la construcción de una nueva grilla de cálculo con el mayor detalle posible. Esta grilla se realizó con la información batimétrica de la Carta H-114 al no contar con datos de detalles en la zona de estudio.

El área modelada abarca una extensión de 3 km x 3 km, en un grilla regular constituida por un total de 300 filas por 300 columnas, separados entre sí por una distancia $\Delta x = \Delta y$ de 10 metros, lo cual brinda una resolución espacial adecuada para encarar la solución del problema planteado.

RESULTADOS DE LA MODELACIÓN CON OBRA DE DEFENSA COSTERA

En la Figura 13 se muestra la distribución de alturas de ola obtenidas en el área modelada correspondiente a la dirección ESE. En cada nodo de la grilla se escribieron los resultados de la corrida, y con ellos se construyeron los mapas de iso-amplitud.

Los espigones se representan con cinco segmentos, separados entre sí. Lógicamente, por dicha separación la ola penetra y se propaga más que en la parte posterior de los espigones.

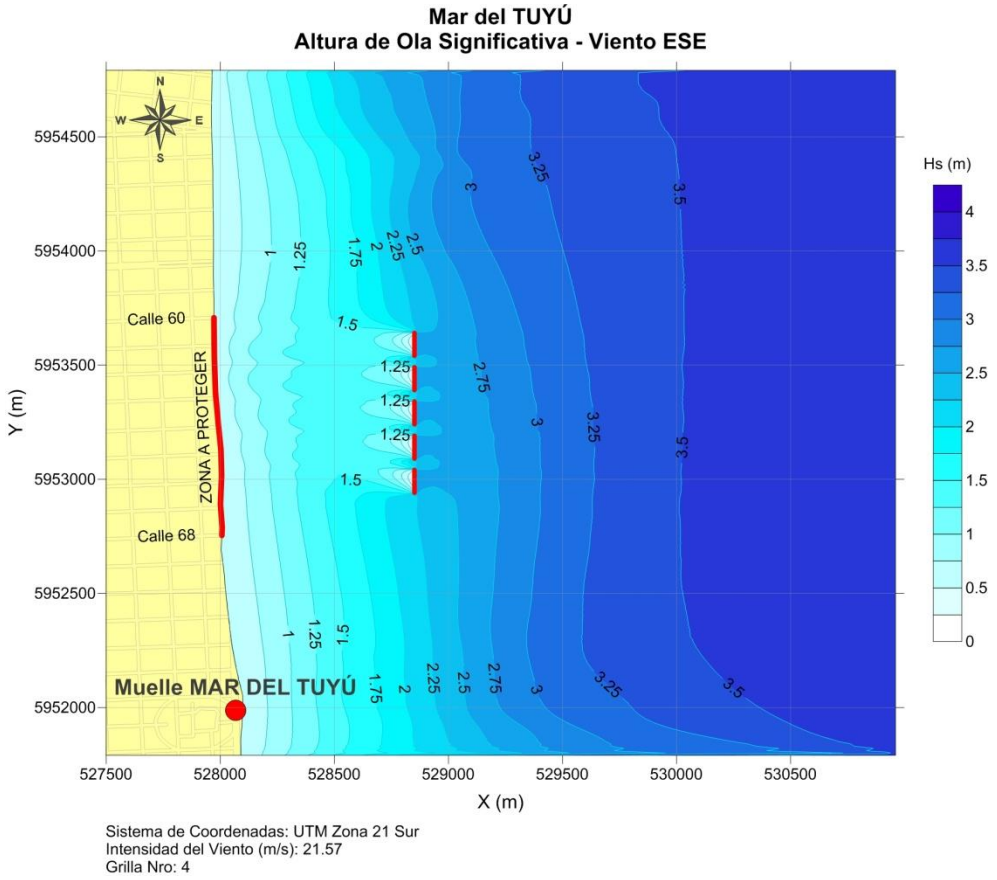

Figura 13.- Curvas de altura de ola con obra para la dirección ESE.

Se observa en la Figura 13 la notable atenuación de las olas provocada por las estructuras de defensa. Las olas que provienen del este son las más atenuadas (en promedio) por las estructuras, en cambio las olas que provienen del sur son las menos atenuadas (en promedio) de todas las direcciones consideradas.

DISMINUCIÓN DE LA ALTURA DE LAS OLAS CON OBRA DE DEFENSA COSTERA

Se escribieron los resultados de la modelación sobre dos perfiles: uno ubicado 50 metros delante de las estructuras (más alejado de la costa) y otro perfil 50 metros detrás de las mismas (más cercano a la playa) con la finalidad de comparar la altura de las olas antes de llegar a la obra y después de ella. Como la longitud de la obra es de 700 metros, se tomaron 71 puntos por perfil para obtener un punto cada 10 metros. En la Figura 14 se muestra un gráfico comparativo de altura de ola para uno de los escenarios modelados.

Figura 14.- Atenuación de las olas por efecto de la obra.

En el eje x se representa la distancia en metros. La progresiva 0 corresponde al inicio del rompeolas nro. 1, y la progresiva de 700 metros, al final del rompeolas nro. 5, ubicado más al norte.

Delante de la obra, las alturas de ola a lo largo del perfil varían en solo unos pocos centímetros, no ocurre lo mismo en el perfil detrás de la obra, donde comienzan a notarse diferencias importantes.

Los picos de altura de olas más altas (línea azul, 50 metros detrás de la obra) coinciden con las separaciones entre los rompeolas sumergidos, por donde las olas pueden pasar con mayor facilidad. Las mínimas alturas de olas se producen detrás de las obras, donde las olas rompen o son reflejadas por la estructura.

En la Tabla 6 se presenta la atenuación del oleaje en promedio que se produce en las corridas del modelo SWAN por efecto de los rompeolas, para las 9 direcciones del viento consideradas.

Tabla 6.- Porcentaje de atenuación de las olas por la presencia del rompeolas.

N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
51	55	58	55	54	55	55	53	49

CONCLUSIONES

La táctica adecuada de manejo de los recursos costeros son factores estratégicos para el desarrollo económico y social en cualquier parte del mundo, y principalmente cuando se trata de una localidad cuya base económica es el turismo de sus playas.

En el presente trabajo se presentó la descripción y el desarrollo de las tareas destinadas a la caracterización del oleaje del frente costero sobre el cual se propone la construcción de un sistema de rompeolas aislados, paralelos a la línea de costa.

El comportamiento de la obra de protección se evaluó mediante la aplicación del modelo de propagación de olas SWAN, con el propósito de evaluar las condiciones de oleaje generadas en el área de influencia de los rompeolas para distintos escenarios de oleaje incidente.

En función del conjunto de escenarios analizados, puede establecerse que es esperable que la presencia de un sistema de rompeolas en la zona de estudio produzca una importante reducción de las alturas de olas que se propagan hasta la costa, favoreciendo la incorporación de arena a la playa y protegiéndola de los embates de los temporales.

REFERENCIAS

D`Amico, G 2009. Fragilidad de los espacios litorales. Lineamientos para comprender la erosión costera inducida en el litoral marítimo bonaerense. El caso de la localidad de Mar del Tuyú.

Datos IFREMER. Página web: ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/gridded/wavewatch3/HINDCAST/

Delft University of Technology, 2004. SWAN User Manual (ver. 40.31), Faculty of Coastal Engineering and Geosciences, Netherland.

Haspert, Carlos A., 2013. Tesis de Licenciatura en Gestión Ambiental Urbana. Aporte de la modelación matemática en el manejo costero. Caso práctico de aplicación en la localidad de Mar del Tuyú.

Kalnay et al.,The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 437-470, 1996.

Servicio de Hidrografía Naval. Página web: http://www.hidro.gov.ar/