

## SISTEMA DE MODELACIÓN PARA EL PRE-DIMENSIONAMIENTO DE UNA OBRA DE PROTECCIÓN COSTERA EN LAS TONINAS, ARGENTINA

### MODELLING SYSTEM FOR THE PRE-DESIGN OF COASTAL PROTECTION WORKS IN LAS TONINAS, ARGENTINA

Lucas Bindelli<sup>a</sup>, Mariano Re<sup>a</sup>, Nicolás Tomazín<sup>b</sup>, Federico Haspert<sup>b</sup> y Carlos Haspert<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Programa de Hidráulica Computacional, Subgerencia Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua (INA), Au. Ezeiza – Cañuelas, tramo Jorge Newbery Km 1,620, Ezeiza, Argentina, lucasbindelli@gmail.com, <https://www.argentina.gob.ar/ina>*

<sup>b</sup>*Programa de Hidráulica Marítima, Subgerencia Laboratorio de Hidráulica, INA*

**Palabras clave:** Estrategia multi-modelo, erosión costera, infraestructura, diques exentos.

**Resumen.** La necesidad de proteger un tramo costero de la localidad de Las Toninas (Provincia de Buenos Aires, Argentina), tanto por su situación crítica respecto de la erosión como por la presencia de cables submarinos de relevancia, implica un estudio detallado de la posibilidad de implementación de una obra de infraestructura. Se analizaron distintas variantes de un sistema de rompeolas desvinculados evaluando distintos aspectos del diseño de la obra. Para seleccionar la mejor opción se avanzó con una estrategia multi-modelo, resolviendo la hidrodinámica de detalle (niveles, velocidades y oleaje), el transporte de sedimentos y la evolución morfológica de la situación con obra. Considerando los resultados de los distintos modelos, se realizó el cálculo estructural de la obra definiendo su sección transversal y el material para construirla.

**Keywords:** Multi-model strategy, coastal erosion, infrastructure, detached breakwaters.

**Abstract.** The need for protection of a coastal area of the town of Las Toninas (Province of Buenos Aires, Argentina), both due to its critical situation with respect to erosion but also to the presence of relevant submarine optic fiber cables, implies a detailed study of the possibility of implementation of an infrastructure project. Different alternatives of a system of detached breakwaters were analyzed, evaluating different aspects of the design of the work. To select the best option, a multi-model strategy was undertaken, resolving the detailed hydrodynamics (water levels, velocities and waves), sediment transport and the morphological evolution of the situation with the coastal works. Considering the results of the different models, the structural calculation of the breakwaters was carried out, defining its cross section and the materials to build it.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Partido de La Costa cuenta con aproximadamente el 50% de su línea costera urbanizada (Tomazin et al., 2020). La localidad balnearia de Las Toninas, al norte del partido, prácticamente presenta la totalidad de su frente costero con infraestructura urbana, además de un sostenido crecimiento de la población estable durante los últimos años. El análisis llevado a cabo por Marcomini y Lopez (2010) considerando parámetros tales como la conservación de la duna costera, erosión costera y de playa, la erosión por drenajes pluviales y los ciclos naturales de la playa muestra que varios sectores del frente costero de Las Toninas se encuentran en situación crítica (Figura 1). El sector norte de la localidad, entre las calles 4 y 10, se presenta como el de mayor vulnerabilidad a la erosión, entre calles 10 a 18 la vulnerabilidad es moderada y de la 18 a la 50 es baja.

Además de la situación crítica del sector norte de la localidad, tanto en la situación presente como en lo contemplado por las proyecciones futuras en el marco del cambio climático (Tomazin et al., 2020), se destaca que esta zona costera recibe los cables de fibra óptica que sostienen el sistema de telecomunicaciones del país (Figura 1).



Figura 1: Izquierda: Localidad de Las Toninas y ubicación aproximada de los cables de fibra óptica. Derecha: Impactos de la erosión costera sobre la línea municipal de la avenida Costanera en Las Toninas ([https://youtu.be/2\\_QipNz4u24](https://youtu.be/2_QipNz4u24), visitado 29/11/2021).

La magnitud del impacto de la sudestada de marzo de 2021 ha promovido el contacto entre las autoridades del Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires, específicamente de la Dirección Provincial de Hidráulica (DPH), y el Instituto Nacional del Agua (INA), a los efectos de brindar el asesoramiento técnico destinado a la elaboración de un plan de estudios para la evaluación del predimensionamiento de una obra de protección basada en la ejecución de una serie de rompeolas semisumergidos, paralelos y separados de la línea de costa (diques exentos o shore-parallel breakwaters por su nombre en inglés).

El criterio general para la determinación de la cantidad y dimensiones de los diques exentos considerará la formación de salientes, pero no de tómbolos en su región de sombra (Figura 2).

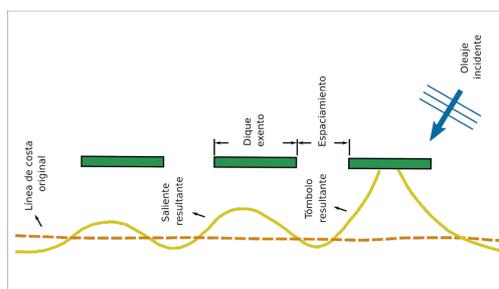


Figura 2: Disposición de la página.

Para este caso de estudio se propone una metodología que contemple las formulaciones empíricas y recomendaciones previamente enunciadas para dar como resultado una serie de alternativas de obra a evaluar mediante las distintas herramientas de modelación numérica disponibles. El tramo a proteger está definido por dos zonas diferentes:

a. un sector de gran vulnerabilidad a la erosión costera, fuertemente impactado por la sudestada de marzo 2021, que abarca desde la calle 6 hasta la calle 16, y

b. un tramo que, si bien presenta mayor nivel de protección frente al fenómeno erosivo (presencia de dunas y vegetación, entre otras características), resulta clave para la protección de la infraestructura en telecomunicaciones del país (calles 16 a 24). Esto determina la necesidad de protección continua del frente costero desde la calle 6 hasta la 24 inclusive (unos 1600 m).

## 2 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Una obra de estas características presenta una complejidad elevada, principalmente debido a los distintos aspectos a evaluar, cada uno con escalas temporales y espaciales distintas (Figura 3). Es por ello que no tiene sentido abordar el proyecto con un único enfoque o herramienta, sino abordarlo desde una estrategia multi-modelo que utilice programas específicos para cada aspecto.

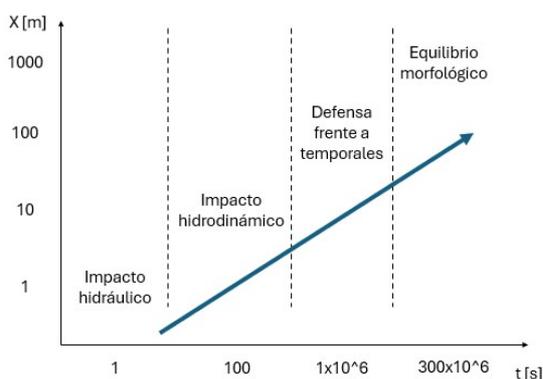


Figura 3: Escalas temporales y espaciales a resolver según los distintos aspectos de relevancia de la obra.

A continuación, se enumeran las distintas herramientas utilizadas, remarcando las cualidades por las que se eligieron y los resultados obtenidos. Cabe remarcar que, para acotar los trabajos, los puntos 2.3 y 2.4 se evaluaron en simultáneo para seleccionar la mejor alternativa de disposición de espigones, mientras que los puntos 2.5 y 2.6 se hicieron a modo de verificación de la alternativa seleccionada en los puntos anteriores.

### 2.1 Formulaciones para la selección de alternativas

**Descripción conceptual:** El dimensionamiento de un dique exento depende del balance que se pretenda respecto del tamaño y la forma de la saliente a obtener y su estabilidad. Para evaluar estas características, a primera aproximación, se cuenta con una serie de formulaciones empíricas que posibilitan un pre-diseño de la estructura. Estas relaciones surgen del análisis del comportamiento de la línea de costa en diferentes obras realizadas.

**Herramienta utilizada:** Formulaciones empíricas varias.

**Procesos que resuelve:** Predicción del comportamiento morfológico de la playa, principalmente en función de la longitud del dique exento (LB), su distancia a la costa original (XB), el espaciamiento entre diques (GB) y la profundidad en el dique por debajo del nivel medio del agua (hB).

**Ecuaciones que resuelve:** La mayoría de las formulaciones propuestas se basan en la relación  $L_B/X_B$  y se presenta a modo de ejemplo en la Tabla 1 algunas de las formulaciones utilizadas de acuerdo a lo compilado por Chasten et al. (1993).

	<i>Condición</i>	<i>Impacto</i>	<i>Referencia</i>
0	$L_B/X_B < 1.0$	No se desarrolla tómbolo	Shore Protection Manual (1984)
1	$L_B/X_B < 0.4$ a $0.5$	Saliente	Gourlay (1981)
2	$L_B/X_B = 0.5$ a $0.67$	Saliente	Dally y Pope (1986)
3	$L_B/X_B < 1.0$	No se desarrolla tómbolo (dique solitario)	Suh y Dalrymple (1987)
4	$L_B/X_B < 2 b/LB$	No se desarrolla tómbolo (diques múltiples)	Suh y Dalrymple (1987)
5	$L_B/X_B < 1.5$	Saliente bien desarrollada	Ahrens y Cox (1990)
6	$L_B/X_B < 0.8$ a $1.5$	Saliente poco desarrollada	Ahrens y Cox (1990)

Tabla 1: Condición para la formación de saliente.

**Simplificaciones:** Las formulaciones son independientes del oleaje incidente y de la profundidad de emplazamiento de la obra, por lo que consisten en una primera aproximación al problema.

**Motivo de utilización y ejemplo de resultados obtenidos:** Al no haber una única formulación que garantice el resultado esperado y considerando además las al menos 4 variables en juego, resultan una gran cantidad de opciones a evaluar, haciendo necesario un primer filtro para el análisis de alternativas a través de la modelación. Por lo que las se utilizaron 24 formulaciones distintas a modo de obtener resultados consistentes en todas ellas, permitiendo así una primera reducción de alternativas (Tabla 2).

	<i>Alternativas</i>	$L_B$ [m]	<i>Isobata</i>	$X_B$ [m]	$G_B$ [m]	$N$	$FCP$ [m]
0	Alternativa 1	130	-2.5	222	160	6	1740
1	Alternativa 2	130	-3	266	190	5	1600
2	Alternativa 3	110	-2.5	222	160	6	1620
3	Alternativa 4	110	-3	266	160	6	1620
4	Alternativa 5	90	-2	126	90	9	1620
5	Alternativa 6	90	-2.5	222	160	7	1750

Tabla 2: Alternativas a evaluar.

Siendo:  $N$  = cantidad de espigones,  $FCP$  = Frente Costero Protegido.

## 2.2 Modelo de oleaje

**Descripción conceptual:** El oleaje generado mar adentro sufre distintas transformaciones a medida que se aleja de su punto de generación y se acerca a la costa. Las variables afectadas son la altura de ola, la longitud de onda, la velocidad y dirección de propagación, entre otras.

**Herramienta utilizada:** SWAN – Simulating Waves Nearshore (Delft University of Technology, Países Bajos).

**Procesos que resuelve:** Generación del oleaje por acción del viento, propagación del oleaje en tiempo y espacio, bajío, refracción por corrientes y profundidad, interacción entre el oleaje, fricción de fondo, disipación por diversos factores, apilamiento por oleaje (wave set-

up), transmisión y reflexión en obstáculos, y difracción del oleaje, entre otros.

**Ecuaciones que resuelve:** El modelo se basa en la resolución numérica de la ecuación general de balance de energía en el dominio del tiempo y del espacio, teniendo en cuenta los efectos de refracción. La ecuación de balance de energía contiene los términos que describen la energía aportada por el viento, y por otra la disipada por fricción, rotura del oleaje y la interacción no lineal entre frecuencias espectrales del oleaje que cumplen determinadas condiciones de resonancia entre ellas. Se trata de un modelo de 3ª generación: no se impone ninguna forma al espectro y la ecuación de propagación de energía se resuelve totalmente, incluyendo términos no lineales.

**Simplificaciones:** Está específicamente diseñado para aplicaciones costeras. Además, no calcula corrientes inducidas por el oleaje. En caso de existir, estas deben añadirse como condiciones de borde.

**Motivo de utilización y ejemplo de resultados obtenidos:** Propagar el oleaje hasta la zona de emplazamiento del proyecto de las obras de defensa y así obtener una caracterización mejorada del clima de olas en cercanías de la costa. Se obtienen series temporales de oleaje en las cercanías del dominio de modelación. Estos datos se utilizarán como condiciones de borde de los modelos a emplear (Figura 4), a la vez que permiten realizar una estadística de oleaje para caracterizar el sitio.

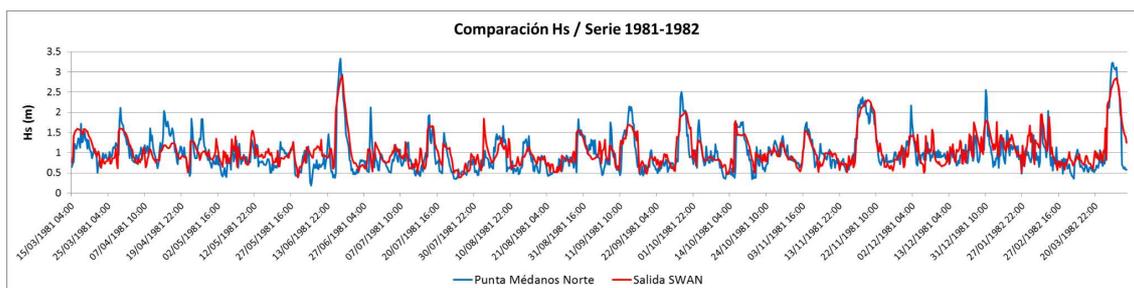


Figura 4: Modelación de la altura significativa de ola (Hs) en Punta Médanos.

### 2.3 Modelo morfológico de mediano y largo plazo

**Descripción conceptual:** La deriva litoral es el transporte de arena que se produce cuando las olas se aproximan a la costa oblicuamente y se someten a una serie de procesos tales como refracción, asomeramiento y difracción, aumentando su pendiente y altura, hasta que finalmente rompen. Durante estos procesos, gran parte del sedimento se pone en suspensión y luego es arrastrado por acción de las corrientes litorales (transporte en suspensión). Por otra parte, las partículas de sedimento más grandes permanecen en el fondo del mar rodando y moviéndose (transporte de fondo). La magnitud de la deriva litoral depende principalmente de las siguientes variables: altura de las olas, niveles de marea, geometría del perfil de playa, granulometría del sedimento y presencia de fuentes o sumideros de sedimentos.

**Herramienta utilizada:** LITPACK (DHI, Danish Hydraulics Institute, Dinamarca).

**Procesos que resuelve:** Cambios morfológicos de largo plazo sobre una línea de costa, lo cual requiere una comprensión del transporte litoral en la región de estudio. Los dos módulos de LITPACK que representan los procesos físicos principales de la dinámica de interés son LITDRIFT y LITLINE. El primero es un módulo que permite simular las corrientes a lo largo de la costa, la deriva litoral y las variaciones morfológicas. Combina un sub-modelo hidrodinámico para cálculo de olas y corrientes a lo largo del perfil de playa con el sub-modelo STP (Sediment Transport Program) para simular los procesos de transporte de

sedimentos, calculando el transporte neto y bruto bajo la acción combinada de olas y corrientes. Simula la distribución transversal de la altura de ola, el setup y la corriente longitudinal para un perfil costero arbitrario. Además, proporciona una detallada descripción de la distribución transversal del transporte sólido longitudinal para una batimetría arbitraria. Este módulo establece las bases para el cálculo de la evolución de la línea de costa con el módulo LITLINE, que es un módulo que calcula la posición de la línea de costa a partir del clima de olas representado como series de tiempo. Este módulo permite introducir cuatro tipos diferentes de estructuras: muelles, espigones, escolleras y revestimientos. Los espigones, en particular, son representados a partir de las distancias de sus extremos respecto a una línea de base previamente definida.

**Ecuaciones que resuelve:** Balance de fuerza en toda la columna de agua mediante un modelo de transporte de sedimento cuasi-3D y la integración de la cantidad de movimiento.

**Simplificaciones:** LITLINE se basa en el concepto de modelos one-line, en el que se supone que los límites del perfil de la playa se mantienen constantes durante la erosión/acreción, por lo tanto, su morfología está directamente relacionada con el cambio de la línea de costa. Además, asume que las estructuras perforan la superficie del mar y se ubican casi paralelas a la línea de base, son impermeables y no reflectivas.

**Motivo de utilización y ejemplo de resultados obtenidos:** En este caso, LITPACK se utilizó para caracterizar la deriva litoral asociada al tramo de Las Toninas y predecir la evolución de la línea de costa a mediano plazo (1 año) y a largo plazo (10 años), a partir de la intervención con la obra de defensa con diques exentos (Figura 5).

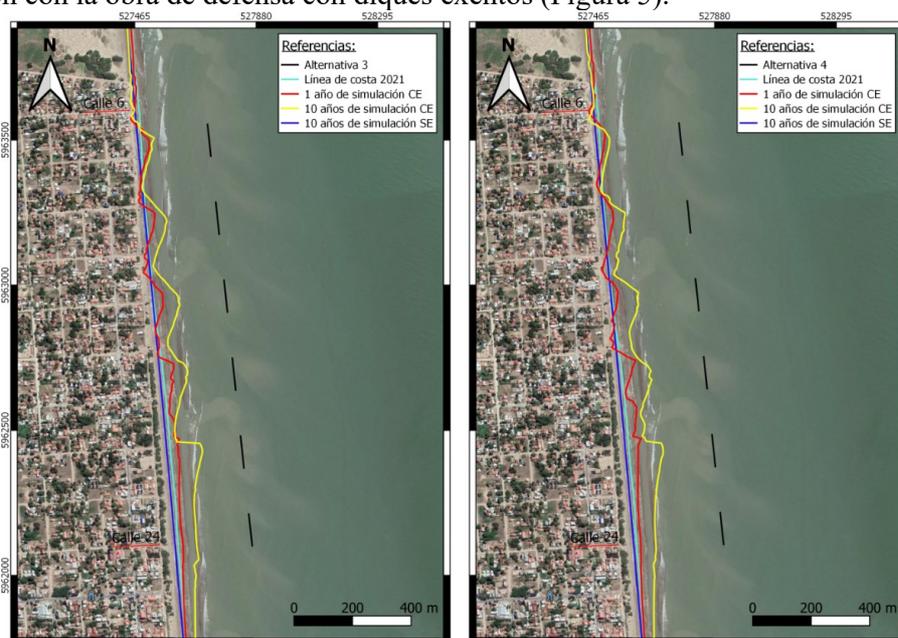


Figura 5: Resultados de la simulación con LITLINE de la evolución de la línea de costa a mediano plazo (1 año) y largo plazo (10 años). SE: Sin Espigones; CE: Con Espigones.

## 2.4 Modelo morfológico de corto plazo

**Descripción conceptual:** Esta situación es similar a la anterior, con la diferencia de que los temporales implican mayores alturas de ola y sobre elevación del nivel del mar, generando remociones de sedimento en grandes volúmenes en comparación con situaciones normales.

**Herramienta utilizada:** XBeach (Deltares, Países Bajos).

**Procesos que resuelve:** Permite estudiar el impacto de ondas de tormenta sobre sectores costeros con una aproximación unidimensional (sobre el perfil de playa) o bidimensional. Simula varios procesos hidrodinámicos entre los que se encuentran la transformación de ondas cortas (refracción, asomeramiento y rompimiento), la transformación de olas largas (ondas de infragravedad; generación, propagación y disipación), el set-up inducido por olas y corrientes impermanentes, el sobrepaso y la inundación. Por su parte, entre los procesos morfodinámicos que se simulan se incluyen el transporte de sedimentos de fondo y en suspensión, desmoronamiento, actualización batimétrica y apertura de brechas.

**Ecuaciones que resuelve:** Resuelve un juego de cinco ecuaciones diferenciales parcialmente acopladas:

- El balance de la acción de las olas cortas.
- El balance de energía en la zona de rompiente.
- La ecuación hidrodinámica de aguas poco profundas (para el flujo medio).
- La ecuación de transporte de sedimentos, suspendidos y de fondo.
- La evolución morfológica del fondo.

**Simplificaciones:** El dominio debe ser de hasta unos pocos kilómetros en cada dirección, de lo contrario los costos computacionales son muy altos. Además, la validez temporal del modelo es para la escala de tiempo de tormentas (~15 días). Escalas mayores presentan un error acumulado demasiado elevado.

**Motivo de utilización y ejemplo de resultados obtenidos:** Permite tomar mejores decisiones frente a diferentes problemas vinculados a la gestión costera: rellenos y nivelación en balnearios en la previa de la temporada de verano, impacto de la intervención sobre dunas, evaluación de medidas no estructurales y diseño de infraestructura para el control de la erosión. Debido a que la ocurrencia de una onda de tormenta o temporal resulta la situación de mayor movilización de arena en el sector de playa estudiado, se analiza la performance de la situación con obra (en sus distintas alternativas) y sin obra durante ese tipo de evento en Las Toninas (Figura 6).

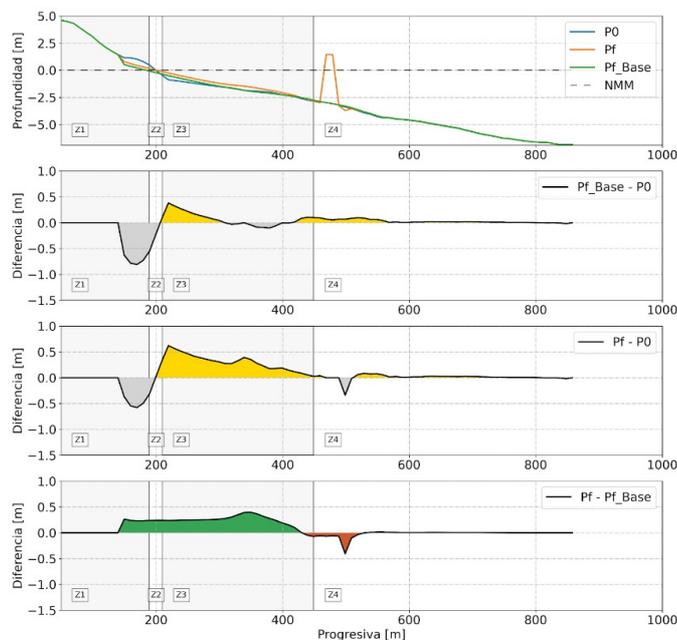


Figura 6: Variaciones relativas del perfil de playa respecto de la situación sin obra: i) perfil inicial, final sin obra y final con obra, ii) diferencias entre los perfiles inicial y final sin obra, iii) diferencias entre los perfiles inicial y final con obra, y iv) diferencias entre los perfiles final sin obra y final con obra.

## 2.5 Modelo de impacto hidráulico

**Descripción conceptual:** El efecto de la barrera generada por la implantación de la obra de múltiples diques exentos se puede cuantificar de acuerdo a la reducción de la altura de las olas mediante el coeficiente de transmisibilidad del oleaje  $K_t$ .

$$K_t = H_i/H_t \quad \text{con } 0 < K_t < 1. \quad (1)$$

En donde  $H_i$  y  $H_t$  representan la altura de las olas aguas arriba (inicial) y aguas abajo (transmitida) de la barrera.

**Herramienta utilizada:** MIKE21-BW (DHI, Danish Hydraulics Institute, Dinamarca).

**Procesos que resuelve:** MIKE21-BW es un modelo numérico de oleaje, del sistema de modelación MIKE21, del tipo *phase resolving* (el campo de ondas se trata de manera determinista siguiendo la evolución de la superficie libre sobre el dominio). Consiste en una herramienta del estado del arte que permite analizar las perturbaciones de las olas en puertos y áreas costeras. En este trabajo se utilizó el módulo 2DH que permite una descripción bidimensional de la superficie libre. Es capaz de reproducir los efectos combinados de fenómenos de oleaje que son relevantes para la ingeniería costera, entre los que se destacan: Asomeramiento, refracción, difracción, rompiente de oleaje, disipación en el fondo, reflexión parcial, propagación de oleaje, interacción no lineal de onda-onda.

**Ecuaciones que resuelve:** Resuelve numéricamente las ecuaciones mejoradas de Boussinesq, es decir, se introducen no linealidades y la dispersión de la frecuencia en las ecuaciones de cantidad de movimiento. Esto último se logra considerando el efecto que tienen las aceleraciones verticales en la distribución de la presión.

**Simplificaciones:** Se consideraron casos de oleaje y nivel estacionarios para una mejor caracterización de la respuesta de la obra.

**Motivo de utilización y ejemplo de resultados obtenidos:** La metodología aquí presentada tiene como objetivo estudiar la capacidad del sistema de rompeolas para atenuar la energía del oleaje incidente. Además de la definición de la cota de coronamiento de las estructuras, se busca cuantificar la atenuación de la energía incidente en función de los efectos que produzcan los espaciamientos entre espigones y la batimetría en la propagación del oleaje. Para ello se analizaron dos condiciones de oleaje frecuentes: una en condiciones normales y otra en condición de temporal (Figura 7).

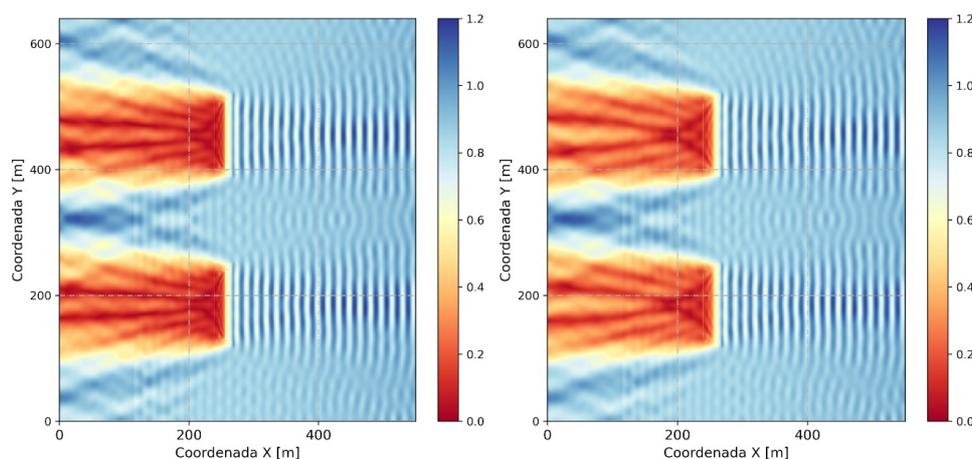


Figura 7: Altura de ola significativa en un sector del dominio modelado considerando el escenario de oleaje 2: a) cota de coronamiento 1 y b) cota de coronamiento 2.

## 2.6 Formulaciones para el cálculo estructural

**Descripción conceptual:** Establecidos los parámetros geométricos que dan forma a la sección transversal de los rompeolas se requiere definir el tamaño y peso del enrocado que conformará las diferentes capas que componen la estructura.

**Herramienta utilizada:** Formulaciones empíricas de SimpleCoast (Deltares, Países Bajos).

**Procesos que resuelve:** Dimensionamiento del enrocado necesario para resistir el oleaje de la zona.

**Ecuaciones que resuelve:** Fórmulas de Van derMeer (1988) y Van Gent et al. (2003), las cuales resultan válidas para estructuras de cresta alta con pendientes formadas por rocas dispuestas al azar (en 2 capas) en aguas profundas y poco profundas.

**Simplificaciones:** Aplica factores de corrección para estructuras de baja altura de cresta, que modifica el valor calculado con la fórmula original.

**Motivo de utilización y ejemplo de resultados obtenidos:** Las expresiones de cálculo fueron utilizadas para determinar el tamaño del enrocado necesario para el talud frontal (pendiente 1:2), el pie y la cresta del rompeolas con una cota de coronamiento de 1 metro por encima del nivel de pleamar media (Figura 8).

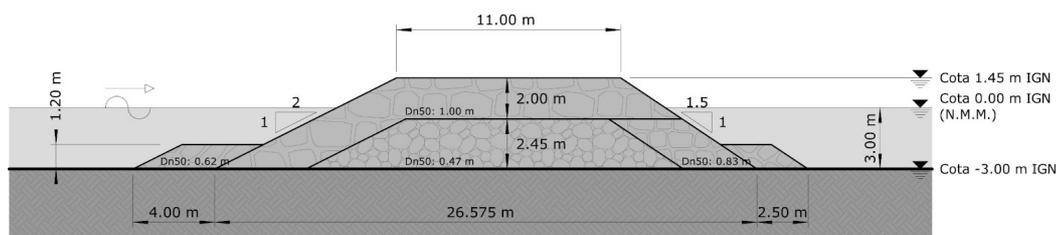


Figura 8: Sección transversal tipo.

## 3 ASPECTOS NUMÉRICOS DE CADA HERRAMIENTA

A continuación, se presenta una tabla resumen (Tabla 3) con las principales características numéricas de cada modelo, a modo de resaltar la importancia de la estrategia multi-modelo adoptada. No se incluyen las formulaciones empíricas, ya que estas no presentan este tipo de características.

Programa	Extensión espacial	Extensión temporal	Resolución espacial	Resolución temporal	Duración de corrida	Procesadores
SWAN	35 x 118 km	10 años	250 x 250 m	1 hr	10 días	1 proc.
LITDRIFT	2,1 x 0,8 km	10 años	10 x 5 m	1 hr	3 hs	1 proc.
LITLINE	2,1 x 0,8 km	10 años	10 x 5 m	1 hr	10 min	1 proc.
XBEACH	2,1 x 0,8 km	16 días	10 x 10 m	0.4 s	16 hs	8 proc.
MIKE21-BW	650 x 350 m	25 min	1 x 1 m	0.05 s	8 hs	1 proc.

Tabla 3: Resumen de características numéricas de los distintos modelos utilizados.

Por último, se presenta un esquema resumen de un perfil de playa zonificado en función de la zona que cada programa resuelve con mayor precisión (Figura 9).

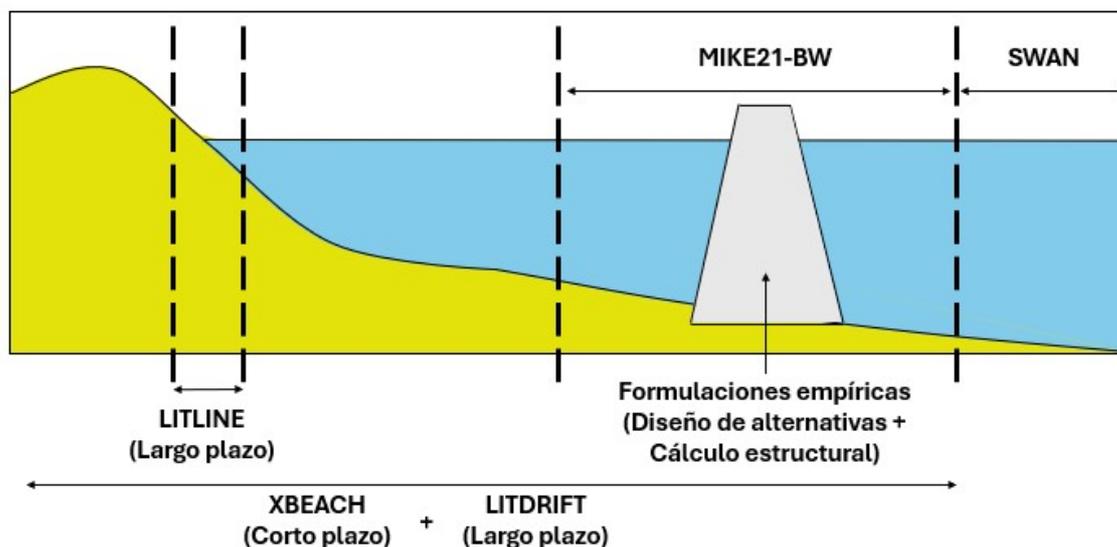


Figura 9: Esquema resumen de la estrategia multi-modelo.

#### 4 CONCLUSIONES

Para el desarrollo del estudio integral de las obras propuestas y su impacto sobre la zona de interés se utilizó una estrategia multi-modelo, abarcando el frente costero del sector norte de Las Toninas que va de la calle 6 a la 24. En base a esto, se implementaron cinco modelos numéricos diferentes para evaluar el comportamiento de seis alternativas posibles de obra caracterizadas de acuerdo a criterios empíricos. Se destaca la versatilidad y precisión que permite esta metodología de trabajo para hacer más eficiente el estudio de cada arista del problema, sin incurrir en costos computacionales desmesurados. Como contracara, esta estrategia implica una mayor cantidad de integrantes en el equipo de trabajo para abordar la diversa cantidad de tareas implicadas dentro de los plazos del proyecto.

#### REFERENCIAS

- Tomazin, N., Re, M., García, P.E., Bindelli, L., Caracterización de la dinámica litoral en la costa marítima bonaerense: aportes hacia una gestión integrada. Informe SLH-INA, 11-376-20, Ezeiza, Argentina, 2020.
- Marcomini, S.C., López, R.A. Erosión y manejo costero en Las Toninas, partido de La Costa, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66 (4): 490-498, 2010.
- Chasten, M.A., Rosati, J.D., McCormick, J.W., Engineering design guidance for detached breakwaters as shoreline stabilization structures. *Coastal Engineering Research Center, Technical Report CERC-93-19*, 1993
- Van der Meer, J.W., Rock slopes and gravel beaches under wave attack. *Doc. Thesis, Civil Engineering, Delft University of Technology*, Delft, The Netherlands, 1988
- Van Gent, M.R.A., Smale, A.J. and Kuiper, C., Stability of rock slopes with shallow foreshores. *Proc. Coastal Structures, ASCE*. Portland, USA, 2003