

Estudio del clima marítimo y prediseño de la defensa costera de Playa Unión, Chubut, Argentina

Ignacio N. Buffa¹, Eder Matías¹, Pintos Gabriela¹, Hillman Gerardo¹, Ragessi I. Matías¹, Pagot Mariana¹ y Rodríguez Andrés^{1,2}.

ILH- CETA. Laboratorio de Hidráulica - Centro de Estudios y Tecnología del Agua, Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina;

2Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Argentina.

Fecha de recepción del manuscrito: dd/mm/aaaa

Fecha de aceptación del manuscrito: dd/mm/aaaa

Fecha de publicación: dd/mm/aaaa

Resumen— La ingeniería costera posee numerosas técnicas para proteger las playas de la erosión, entre ellas el diseño de protecciones continuas con elementos de hormigón diseñados a través de parámetros significativos obtenidos con modelos numéricos como SMC. En este trabajo se presenta un estudio de la dinámica costera de Playa Unión y alternativas para su protección. Playa Unión es una ciudad ubicada en las costas del atlántico sur emplazada a 2 km de Rawson, en la provincia de Chubut. Sobre su costa se presenta procesos erosivos continuos, los cuales se profundizaron durante el año 2021, cuando se alcanzó un escenario extremo durante el cual la marea produjo la destrucción de la infraestructura vial urbana de la costanera de dicha localidad.

En este trabajo se analizó la situación actual, evaluando los principales procesos físicos involucrados en la dinámica costera como la altura de ola significante, el periodo pico, la dirección de propagación, entre otros parámetros. En base a los resultados obtenidos, se propusieron alternativas para minimizar los impactos de erosión local y general observados en la zona sur de Playa Unión tales como medidas de mitigación a corto plazo materializado con una protección longitudinal en el área afectada con elementos de hormigón (Akmoms) y a mediano y largo plazo con espigones cortos y restauración de la playa.

Palabras clave—Playa Unión, Modelación numérica, Akmoms.

Abstract— Coastal engineering has numerous techniques to protect beaches from erosion, among them the design of continuous protections with concrete elements designed through significant parameters obtained with numerical models such as SMC. This paper presents a study of the coastal dynamics of Playa Unión and alternatives for its protection. Playa Unión is a city located on the southern Atlantic coast, 2 km from Rawson, in the province of Chubut. On its coast there are continuous erosive processes, which deepened during the year 2021, when an extreme scenario was reached during which the tide produced the destruction of the urban road infrastructure of the waterfront of the town.

In this work, the current situation was analyzed, evaluating the main physical processes involved in coastal dynamics such as significant wave height, peak period, propagation direction, among other parameters. Based on the results obtained, alternatives were proposed to minimize the impacts of local and general erosion observed in the southern area of Playa Unión, such as short-term mitigation measures materialized with a longitudinal protection in the affected area with concrete elements (Akmoms) and in the medium and long term with short breakwaters and beach restoration.

Keywords— Playa Unión, Numerical modeling, Akmoms.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo tuvo como objeto el desarrollo de un estudio de la dinámica costera en la localidad de Playa Unión, con la evaluación de antecedentes disponibles de proyectos de defensas costeras y la elaboración de recomendaciones y propuestas de protección para el tramo afectado.

La zona de estudio se encuentra al norte de la descarga del Río Chubut en el Mar Argentino como se ve en la Fig. 1.

Dirección de contacto:

Ignacio Nicolás Buffa, Bv. Dr Juan Filloy s/n Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 0351 433-4446, ignacio.buffa@mi.unc.edu.ar



Fig. 1. Ubicación en planta de la zona de estudio.

En este artículo se incluirá la recopilación, sistematización y análisis de los datos disponibles, para la caracterización del clima marítimo en aguas profundas correspondientes al clima externo.

Se presentará la caracterización del clima marítimo (medio y extremo) en aguas profundas con la correspondiente propagación del oleaje hasta la zona de rompiente; el análisis de la dinámica litoral; la evaluación de los procesos morfológicos de la costa para la situación actual y el diseño geométrico de diferentes tipologías de defensas para el control de erosión locales, una a corto plazo (protección longitudinal en el área afectada con elementos de hormigón) y otra a mediano y largo plazo (espigones cortos).

ÁREA DE ESTUDIO

El frente costero de Playa Unión se ubica en la provincia de Chubut al norte del puerto de Rawson y de la desembocadura del Río Chubut en el Mar Argentino. La playa está compuesta de gravas y arenas gruesas en la zona sur y arenas más finas hacia el norte ver Fig.2.

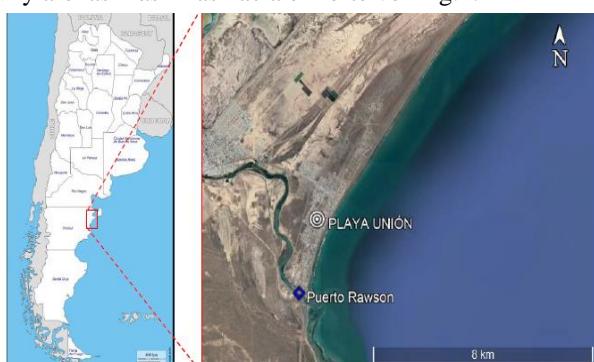


Fig. 2. Ubicación de la zona de estudio.

Actualmente en la zona sur de Playa Unión, próximo a la desembocadura del Río Chubut, existen obras de ingeniería entre las cuales se destacan dos muros de protección o abrigo (jetties) en la descarga del río al Mar Argentino, cuyo objetivo es proteger a las embarcaciones que entran y salen del Puerto de Rawson del oleaje; sobre la margen izquierda del río, entre los muros de abrigo, se encuentra la escollera Norte Antigua construida antes de los muros de abrigo; y finalmente, sobre la playa se construyó un espigón corto a una distancia de 600 m aproximadamente del muro de protección norte ver Fig.3.



Fig. 3. Estructuras existentes en la zona sur de Playa Unión.

El 20 de septiembre del año 2021 se produjo un evento de oleaje intenso en la zona de estudio el cual coincidió con mareas altas. Como consecuencia de este evento se originaron erosiones en el sector ubicado inmediatamente al norte del espigón corto que provocó daños localizados en la rambla ubicada sobre la costanera de Playa Unión. En la Figura 4 se presenta dos imágenes aéreas de la zona afectada en la cual se pueden apreciar el avance de las olas sobre las obras viales provocando daños sobre las mismas durante dicho evento.



Fig. 4. Vista aérea de la zona afectada en el evento del 20 de septiembre de 2021 y Vista de Playa Unión de los daños producidos en la costanera el 20 de septiembre de 2021.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada se basa en el análisis de datos y observaciones de campo, procesamiento de imágenes satelitales y de registro histórico de olas para comprender los fenómenos físicos ocurridos a lo largo de la historia reciente en el frente costero de Playa Unión.

En tanto que, para el diseño de medidas estructurales se utilizaron modelos numéricos y métodos de cálculo empíricos disponibles en la literatura especializada.

Para realizar las modelaciones numéricas se utilizará el software “Sistema de Modelado Costero” (SMC) desarrollada por la Universidad de Cantabria, España. El SMC integra una serie de modelos numéricos acoplados que permiten simular la propagación del oleaje hasta la línea de costa, las corrientes territoriales y obtener los perfiles de equilibrio de la playa y líneas de costa para el corto y largo plazo, incorporando diferentes estructuras de protección costera.

INFORMACIÓN DE ANTECEDENTES Y DIAGNOSTICO

Se recopiló, clasificó y sistematizó toda la información provista por la Dirección de Infraestructura Portuaria de la provincia de Chubut; se analizaron estudios antecedentes para comprender los efectos producidos por las intervenciones antrópicas en la evolución de la línea de costa en Playa Unión (Hidroeléctrica Ameghino S.A, 2011) y (Beltrán & Granada, 2016) y en función de estos datos se elaboró un diagnóstico de la situación actual.

Intervenciones antrópicas

A continuación, se describen brevemente en orden cronológico las principales obras ejecutadas que afectan el equilibrio dinámico de la playa.

- **Año 1950-1963:** Construcción del Dique Florentino Ameghino sobre el Río Chubut. Este tiene un impacto significativo en el aporte de sedimentos desde el sistema fluvial del río Chubut a Playa Unión.

- **Año 1960-1963:** Construcción del espigón Norte Antiguo en la desembocadura del Río Chubut.

- **Año 1972-1974:** Construcción del espigón Sur Antiguo en la desembocadura del Río Chubut. La construcción de los mismos alteró los caudales sólidos provocando la retención de sólidos y la formación del banco de arena sur. Así la tasa de aporte de arena a la disminuyó y por consiguiente la playa retrocedió paulatinamente, según cuenta el Ingeniero Alberto Lagrange en su libro “Mar, Playas y Puertos” (1993).

- **Año 1977:** Construcción de pantallas experimentales de protección para evitar efectos erosivos.

- **Año 1979:** Construcción de espigón con bloques premoldeados de hormigón simple.

- **Año 2002:** Prolongación de la escollera Sur en la desembocadura del río Chubut.

La extensión de la escollera sur generó un impacto en el transporte de sedimentos similar al observado por Lagrange en 1976. Generando un bloque parcial de la deriva litoral y modificando su trayectoria alejándola de la línea de costa.

- **Año 2003:** Prolongación de la escollera Norte Nueva en la desembocadura del Río Chubut. La construcción aleja de la playa la descarga de los sedimentos transportados por el Río Chubut lo cual puede afectar los aportes de sedimentos a la zona sur de Playa Unión contribuyendo al proceso de erosión localizado en la zona.

- **Año 2006:** Construcción del espigón corto 600m al norte de la escollera construida. La construcción de esta estructura tuvo el objetivo contener los sedimentos ubicados hacia el sur para controlar los procesos de erosión de la playa y garantizar la estabilidad de la escollera norte. Por otro lado, esta estructura generó erosiones localizadas inmediatamente al norte del espigón corto, situación observada en el evento del 20 de septiembre de 2020.



Fig. 5. Estructuras existentes en la desembocadura del río Chubut.

Información topo batimétrica

Se utilizaron los datos topo batimétricos proporcionados por la Dirección de Infraestructura Portuaria de la provincia de Chubut. Las batimetrías fueron realizadas durante los años 1996, 2004, 2006, 2008, 2010 y 2014 y se indican en la Fig. 6.



Fig. 6. Estructuras existentes en la desembocadura del río Chubut.

Las zonas relevadas se encuentran al norte de la escollera Norte (Fig. 7a), en una extensión de aproximadamente 6.5 km, además, se presentan las curvas de nivel obtenidas a partir de los datos topo batimétricos en la Fig. 7.

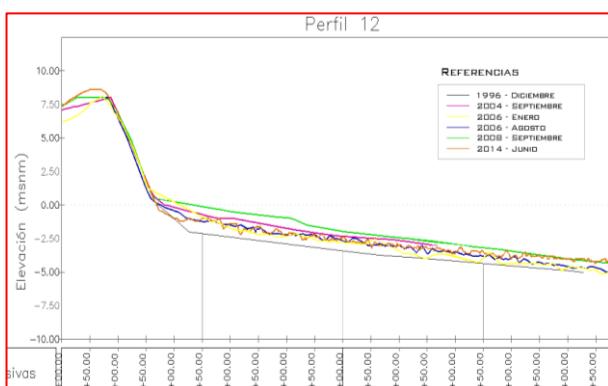
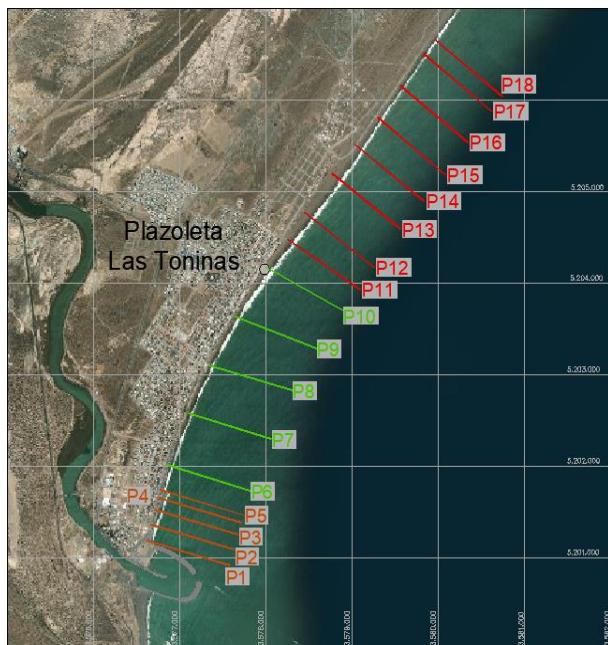


Fig. 7. Perfiles perpendiculares a la playa y perfil topo-batimétrico N° 12 correspondientes a cada año.

Análisis de la evaluación de la línea de costa

A partir de la información topo batimétrica y del análisis de imágenes satelitales multiespectrales, se definió la franja de oscilación de la línea de marea, tanto en pleamar como en bajamar, y las tendencias evolutivas observadas durante 20 años (2002-2021).

Los productos satelitales utilizados en este estudio resultaron de imágenes QuickBird, Geoeyes, WordWiew e Ikonos, con alta resolución espacial, submétrica, junto con las imágenes satelitales de resolución espacial media, productos de la serie LANDSAT, los cuales se encuentran disponibles desde 1972 a la actualidad y de Sentinel 1 y 2 disponibles desde 2014 a la fecha.

En el caso de las imágenes satelitales de alta resolución, se dispone en formato remuestreado (quickwiev), con un tamaño de pixel de 4 m. Se utilizó el programa QGIS (de libre acceso) para el procesamiento de imágenes satelitales y organización de la información geográfica adquirida y generada.

Finalmente, los resultados obtenidos son los descriptos a continuación. Las líneas de mareas instantáneas delimitadas en este trabajo se presentan en la Figura 8. En esta figura se realizó la superposición de las líneas de referencia del año 2021 (en negro) y las diferentes líneas de costa detectadas para las imágenes analizadas.



Fig. 8. Líneas de marea instantáneas máximas definidas para la región de Playa Unión entre 2002 y 2021.

Eventos extremos observados

Los eventos extremos de oleaje en Playa Unión se producen cuando coinciden niveles de mareas altas con alturas de olas significativas producidas por vientos provenientes de los sectores Este, Sureste o Suroeste. Durante estos eventos las olas se propagan hasta la parte superior del perfil de playa y rompen cerca de la costanera generando un transporte longitudinal y transversal de sedimento. Estos fenómenos pueden generar erosiones de corto plazo en la parte superior de la playa.

Se han registrado procesos de erosión a corto plazo en la zona de estudio en agosto de 2010, en la Figura 9 se puede observar la erosión producida por este evento al pie del muro de la costanera ubicado al norte del espigón corto.



Fig. 9. Erosión al norte del espigón corto en agosto del 2010.

Más recientemente, en septiembre de 2020 y febrero 2021 como se ve en la Fig. 10 se produjeron eventos extremos con oleajes intensos en la zona de estudio. El evento ocurrido en

septiembre de 2020 produjo importantes daños en la rambla de Playa Unión, en la zona del espigón corto, como puede observarse en la Fig. 10. En este evento se descalzó el muro de la costanera y la vereda peatonal correspondiente.



Fig. 10. Oleaje impactando sobre la costanera el 19 de febrero de 2021.

Posteriormente, en febrero del 2021 se produjo un evento cuyo oleaje volvió a impactar en la costanera sobre los muros descalzados en septiembre de 2020. Durante estos dos eventos se registraron videos del oleaje en la zona del espigón corto a partir de los cuales se estimó un periodo del oleaje aproximadamente 10 a 12 segundos.

Diagnóstico de la situación actual

A partir de las imágenes satelitales, los relevamientos topográficos y de las intervenciones antrópicas, se realiza una descripción cualitativa de la dinámica actual de los sedimentos en Playa Unión.

Se pudo identificar, por un lado, una zona de erosión y retracción de playa en el sector ubicado al norte del espigón corto y hasta el anfiteatro de Playa Unión aproximadamente y, por otro lado, una zona de acreción por sedimentación hacia el norte del anfiteatro (ver Fig. 11). Esta situación evidencia un cambio en la dinámica de los sedimentos en el frente costero de Playa Unión el cual puede atribuirse a múltiples factores antrópicos como la construcción de las escolleras de abrigo del puerto Rawson en la desembocadura del río Chubut, la reducción en los aportes de sedimentos del río Chubut por la construcción del Dique Florentino Ameghino o a un cambio en el régimen del oleaje incidente en la zona por factores globales como modificaciones del nivel del mar.



Fig. 11. Zona de erosión y sedimentación en el área de estudio.

Particularmente, en la zona ubicada inmediatamente al Norte del espigón corto, donde se produjeron los principales daños en el evento del 20 de septiembre del año 2020, se observan erosiones locales por efecto del espigón y al mismo tiempo acumulación de sedimentos al Sur del espigón, lo cual evidencia que las corrientes y el transporte de sedimentos tiene dirección predominante hacia el Norte.

CLIMA MARÍTIMO

A partir de los datos de viento y oleaje (1990-2020), obtenidos de la base de datos del Servicio de Cambio Climático de Copernicus (C3S, Copernicus Climate Change Service), se realizó, por un lado, un análisis de estados de mar extremas y, por otro lado, la caracterización de un estado de mar medio.

En primer lugar, se realizó un análisis estadístico descriptivo de siete puntos característicos ubicados aguas afuera descriptas en la Fig. 12.



Fig. 12. Puntos de extracción de información en la zona de estudio.

Posteriormente, se seleccionaron los puntos más desfavorables para el oleaje extremal y se ejecutó una serie de análisis de frecuencias, en cada uno de los puntos más desfavorables, para definir los eventos extremos asociados a diferentes períodos de retorno (T_r). Conjuntamente, se correlacionaron los principales parámetros del oleaje (altura

de ola significante H_s , periodo de pico T_p y dirección de propagación) como se ve en la Fig. 13.

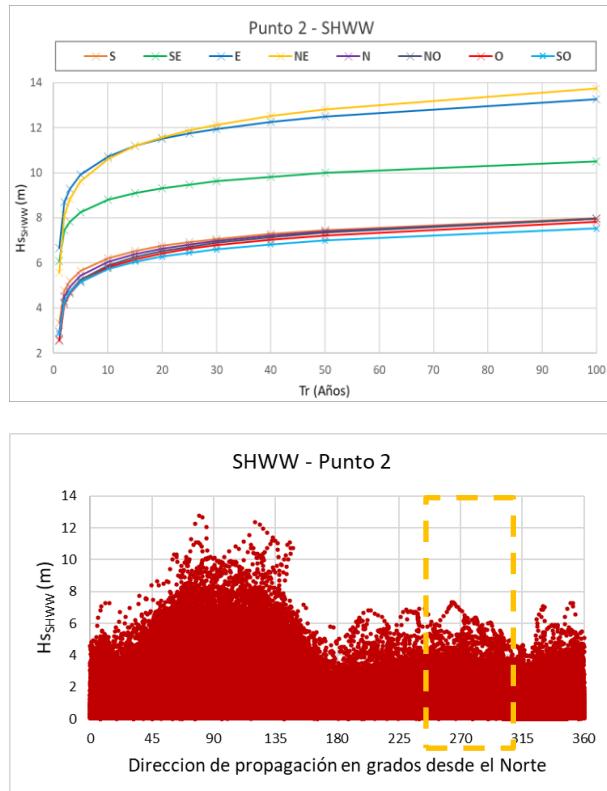


Fig. 13. Magnitud de los vientos provenientes del Noroeste, Este y Sureste por periodo de recurrencia en el punto 2 y Altura de ola significativas en el punto 2 en función de la dirección de propagación del oleaje.

Escenarios de diseño

A partir de los datos históricos de oleaje obtenidos en este estudio, adquiridos de la base de datos provistos por el Servicio de Cambio Climático Copernicus (C3S, Copernicus Climate Change Service) se presentan los estados de mar adentro utilizados para el diseño geométrico y la verificación estructural de las obras de protección a mediano y largo plazo.

Escenario extremal

Se presenta a continuación el escenario de oleaje extremal aguas afuera para una recurrencia de T_r : 50 años. El evento crítico corresponde a un oleaje propagándose en dirección Oeste desde el Punto 2 (ver Fig. 14). Además, se presenta la relación entre las alturas significativas de olas de viento (SHWW) y el periodo de pico (T_p) correspondiente.



Fig. 14. Direcciones de propagación de los escenarios de diseño y Relaciones entre altura de ola significativa de viento SHWW y T_p para oleajes Oeste en el punto 2.

En la Tabla 1 se presenta la altura de olas significativas correspondientes a T_r : 50 años y su correspondiente periodo de pico T_p .

TABLA 1. Alturas de ola significativa H_s y periodo de pico correspondientes a los escenarios de diseño.

T_r (años)	Pto 1 - SO		Pto 2 - SO		Pto 3 - SO	
	H_s (m)	T_p	H_s (m)	T_p	H_s (m)	T_p
50	7.4	10.0	7.6	10.2	7.4	10.2

Escenario medio

El clima medio de oleaje se define como un conjunto de estados de oleaje de mayor probabilidad de ocurrencia. Con lo cual, a partir de los datos del oleaje, se pueden hacer una aproximación de cuál será el comportamiento en el mediano plazo, asumiendo que las propiedades estadísticas de las series se mantendrán invariantes.

Para la determinación del clima de olas medios incidentes en la zona de estudio se implementó la función de distribución de probabilidades empírica de Weibull con los datos de oleaje ya vistos, siendo el lugar de aplicación el punto 2. Para su implementación, las alturas de olas deben ser agrupadas en intervalos regulares y pueden o no agruparse en función de la dirección de propagación, en este caso las mismas fueron agrupadas en las tres direcciones de mayor incidencia. La función de distribución de probabilidades de Weibull tiene la siguiente expresión ec. (1):

$$F(x) = 1 - e^{(\frac{x-A}{B})^c} \quad (1)$$

Donde: A = Se define como parámetro de escala. Adopta valores positivos.

B = Es el parámetro de centrado y su valor ha de ser menor que el menor de los valores.

C = es el factor de forma. Suele encontrarse entre 0.5 y 3.5.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos considerando como dirección principal de propagación el oeste y con diferentes intervalos de agrupamiento de alturas de olas.

TABLA 2. Probabilidad de no excedencia con su altura de ola significativa hs.

Probabilidad de no excedencia	Altura de ola Hs (m)
0.10	1.60
0.25	2.40
0.50	3.5
0.75	4.80
0.90	5.90
0.95	6.60
0.99	7.90

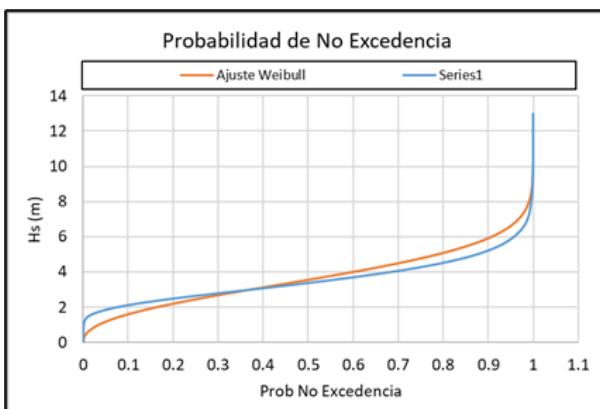


Fig. 15. Gráfico comparando la probabilidad de no excedencia con su altura de ola correspondiente.

PROPAGACIÓN DE OLEAJE

Para realizar la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la costa se utilizó el modelo OLUCA en el cual permite simular la propagación del oleaje en aquellas regiones donde los efectos de la difracción son importantes. Para analizar la respuesta de la playa y los procesos costeros en el corto plazo, ante la acción de un evento de diseño, se realizó un modelo numérico con el Sistema de Modelado Costero (SMC) desarrollado por la universidad de Cantabria (España).

El modelo de propagación Oluca-SP requiere como entrada en el contorno exterior (mar adentro), un estado de mar direccional, el cual está representado por un espectro bidimensional discretizado en componentes frecuenciales y direccionales, las cuales son propagadas de manera simultánea. El modelo OLUCA es un modelo combinado de refracción/difracción, incluye ambos efectos explícitamente

y, por lo tanto, permite el modelado del oleaje en aquellas regiones donde la batimetría es irregular y/o donde los efectos de la difracción son importantes.

Para modelar la propagación del oleaje se confeccionó un modelo digital de elevación combinando el relevamiento topo batimétrico realizado en el año 2010 con el modelo de elevación GEBCO (General Batymetric Chart of the Oceans). Para el cálculo de la propagación del oleaje espectral, desde el punto 2 ubicado aguas adentro hasta la línea de costa, se utilizaron 3 mallas numéricas anidadas con diferentes grados de discretización (ver Fig. 16). Y sus dimensiones descriptas en la Tabla 3.

TABLA 3. Descripción de las mallas modeladas.

Malla	Dominio (Km)	Celdas (m)
1 - Roja	110x60	500x500
2 - Azul	18x13	50x50
3 - Naranja	1.8x3.2	10x10

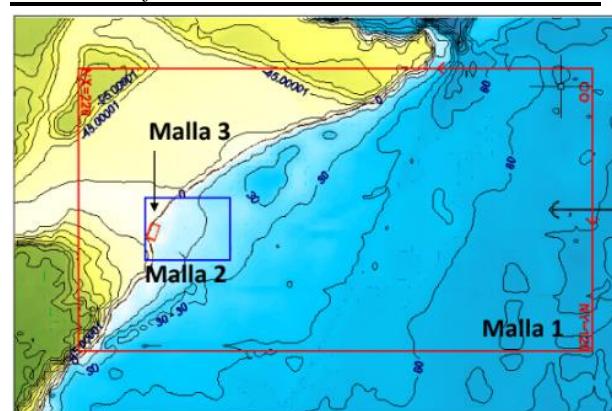


Fig. 16. Mallas numéricas para la propagación del oleaje hasta la línea de costa.

Escenarios

Se adoptó como evento de diseño un estado de mar extremal correspondiente a un período de recurrencia de 50 años propagándose, desde el punto 2, en dirección Oeste: altura significante de $Hs: 7.6\text{ m}$ y el período de pico $Tp: 10.2\text{ seg}$. Este oleaje ha sido propagado en cinco escenarios de marea:

TABLA 4. Tabla resumen escenarios.

Escenarios	Oleaje (m)	Hs (m)	Tp (seg)	
1	Pleamar máxima	5.2	7.6	5.2
2	Pleamar media	4.2	7.6	10.2
3	Media marea	2.75	7.6	10.2
4	Bajamar media	0.99	7.6	10.2
5	Bajamar mínima	0.24	7.6	10.2

Resultados

A continuación, se presenta a modo de ejemplo los resultados obtenidos para el Escenario 1 (altura de ola significante Hs , dirección de propagación y espectro de oleaje en diferentes puntos del dominio).

En la Figura 17 se presenta las mallas numéricas empleadas para la propagación del oleaje.

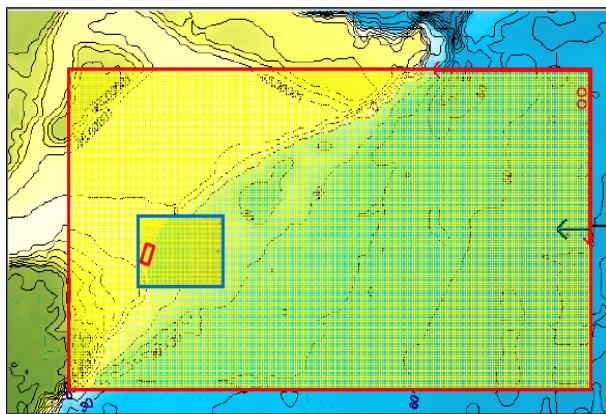


Fig. 17. Mallas numéricas para la propagación del oleaje hasta la línea de costa.

En la Figura 18 se muestran los campos de alturas de olas significativas y los vectores de propagación correspondientes a la malla 3, y en la Figura 19 los espectros de energías de olas correspondientes a 3 profundidades diferentes.

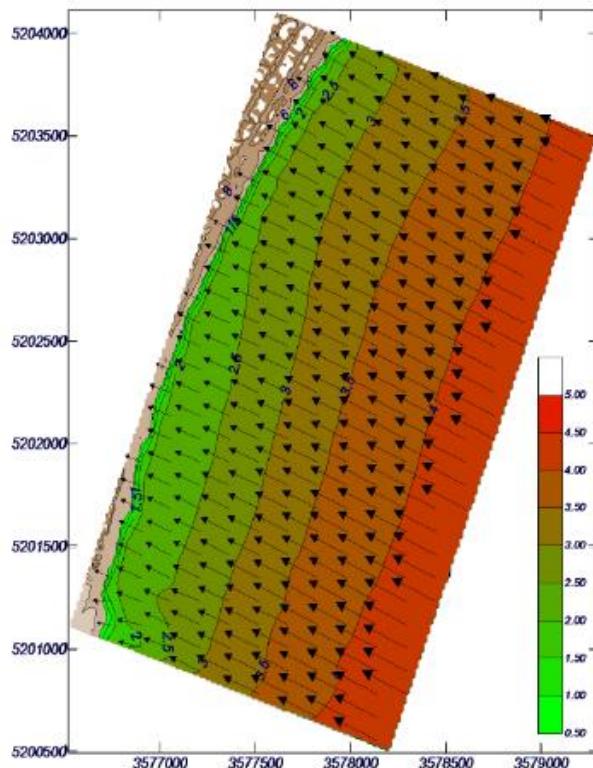


Fig. 18. Altura significante de ola y dirección de propagación en Malla 3 – Escenario 1

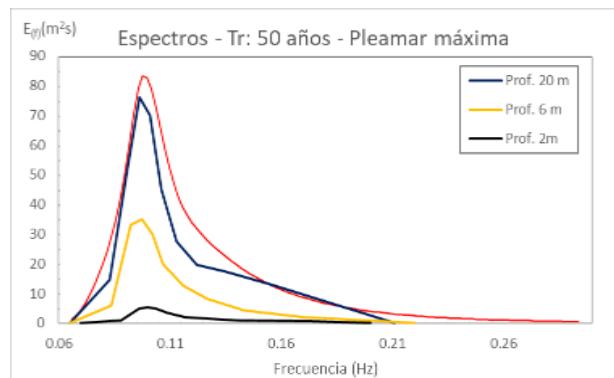


Fig. 19. Espectros de energía de oleaje para Tr: 50 años en pleamar máxima – Escenario 1.

Luego, analizando los resultados obtenidos como las alturas de olas significante y los espectros de energía de oleaje en todo el dominio de la malla; se utilizó para el desarrollo de la propuesta técnica a una profundidad de 1.4 metros, de donde se obtiene una altura de ola significante de 2.2 metros, que posteriormente fue la utilizada para realizar el diseño de la propuesta técnica.

PROPIUESTA TÉCNICA – TIPOS DE ALTERNATIVAS

Como medidas estructurales de protección se presenta el diseño de diferentes alternativas de defensa continua, las cuales consisten en una protección de escollera inclinada, compuesto por elementos de hormigón premoldeado (akmons, tetrápodos y cubos).

Protección a corto plazo

Se propone ejecutar una protección continua en la playa ubicada en la zona norte del espigón corto. Esta defensa consiste en una escollera compuesta por elementos de hormigón premoldeado. Esta presenta como límites territoriales el paquete estructural de la Av. Costanera (al Oeste) y el espigón corto existente (al Sur), y como límite marítimo (el Este) como se ve en la Fig. 20.



Fig. 20. Mallas numéricas para la propagación del oleaje hasta la línea de costa.

A continuación, se resumen los criterios y variables de diseño para el de cálculo general de una escollera y, posteriormente, el dimensionado de tres tipologías de defensa para el caso de estudio.

Factores de diseño

La variable determinante para el dimensionamiento de los elementos de hormigón premoldeados de una escollera es la altura de ola significante H_s , según lo establecido en el Shore Protection Manual (US Army Coastal Engineering Research Center, 1973). Para el caso en estudio el valor de H_s es de 2.2 m, que fue presentado en el apartado de propagación de oleaje en lo referido a los escenarios.

El diseño de la protección se efectúa partiendo del cálculo del esfuerzo generado por un oleaje que impacta en la zona a proteger. Para el cálculo de dicho esfuerzo, se consideró como hipótesis la situación de ola en rompiente, considerada como la más desfavorable, de manera que sean aplicables los métodos de cálculo desarrollados por Iribarren (1938) y Hudson (1953, 1959, 1961).

El peso sumergido del bloque (W_s) puede expresarse como su peso específico, γ_r , por su volumen menos el peso del agua que desplaza. Además, se supone que el volumen de la unidad se puede expresar como b veces el cubo de su dimensión característica d , siendo b una cierta constante. Expresando esto último como una ec. (2) se obtiene:

$$W_s = (\gamma_r - \gamma) * b * d^3 \quad (2)$$

Y la fórmula de Iribarren (1938) ec. (3):

$$W \geq \frac{K * \gamma_r * H^3}{(S_r - 1)^3 * (\mu * \cos \theta - \sin \theta)^3} \quad (3)$$

Donde: K y μ = Coeficientes empíricos que dependen del tipo de unidad de protección

γ_r = Peso específico del bloque

H = Altura de la ola

S_r = Relación entre el peso específico del bloque y el peso específico del agua

θ = Ángulo con respecto la horizontal

Una desventaja que presenta esta fórmula es la abundancia de coeficientes empíricos, como K y μ , que deben determinarse para un tipo dado de unidad de protección. Por otra parte, dichos coeficientes son dimensionales por lo que se hace difícil extender los resultados experimentales a los casos de prototipo.

Continuando con el trabajo de Iribarren, Hudson realizó extensas investigaciones con el US Army Waterways Experiment Station (WES) y desarrollo una fórmula para determinar la estabilidad de unidades de protección que forman parte de escolleras.

Basándose en resultados de numerosos ensayos sobre modelos y en algunos resultados basados preliminares de ensayos sobre modelos en gran escala, la fórmula de estabilidad resultante es la siguiente ec. (4):

$$W = \frac{\gamma_r * H^3}{K_d * (S_r - 1)^3 * \cot g \theta} \quad (4)$$

Donde K_d : coeficiente de estabilidad que varía fundamentalmente con la forma de las unidades de protección, rugosidad de la superficie de éstas, filo de los bordes y grado de trabazón obtenido en la colocación.

Selección del coeficiente de estabilidad K_d

El coeficiente adimensional de estabilidad K_d de la fórmula de Hudson tiene en cuenta todas las demás variables que no sean el talud de la estructura, altura de la ola, peso

específico de las unidades de protección y el peso específico del agua en el lugar de interés. Las variables más importantes incluyen:

1. Forma de las unidades de protección
2. Cantidad de unidades que integran el espesor de la capa protectora o externa
3. Forma de colocación de las unidades
4. Grado de trabazón de las unidades protectoras
5. Tipo de ola que ataca la estructura (rompiente o no rompiente)
6. Ángulo de incidencia de las olas

Para el caso en análisis, se adoptaron valores de K_d que admiten un daño de hasta el 5% de la estructura para cada alternativa planteada, según lo recomendado en el Shore Protection Manual (US Army Coastal Engineering Research Center, 1973). Para un daño de hasta el 5%, se produce un inicio de avería (Losada, Desire, & Alejo, 1986), en donde algunos de los elementos de la capa protectora pueden ser movidos, y parte de la estructura interna queda expuesta al oleaje.

Unidades de protección de hormigón

La mayor ventaja de los bloques de hormigón que se han desarrollado para ejecutar protecciones es que usualmente poseen un mayor coeficiente de estabilidad, permitiendo de este modo, taludes más escarpados en las estructuras o un menor peso de aquellas. Esto tiene un valor muy particular cuando no se dispone de roca partida del tamaño requerido, como sucede en la situación analizada de Playa Unión.

A continuación, se presentan las unidades seleccionadas para cada alternativa de defensa.

• AKMONS:

Los akmons son bloques de hormigón liso en forma de yunque, desarrollado en 1962 por Delft Hydraulics Laboratory. El mismo se observa en la Fig. 21.

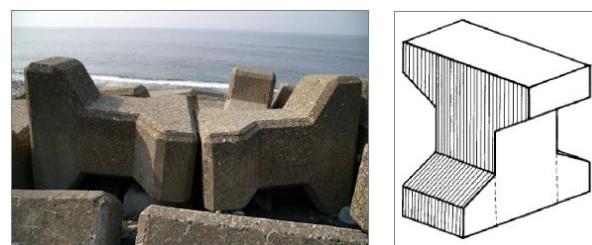
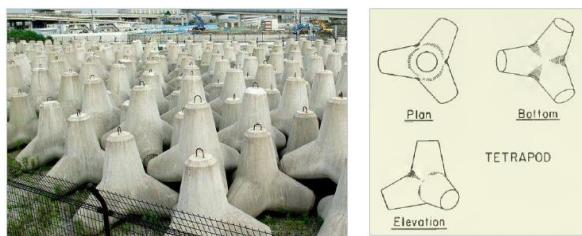


Fig. 21. Defensa de Akmons.

Estos se disponen en mantos bicapa, los cuales resisten las fuerzas del oleaje por dos fenómenos: peso propio y una cierta trabazón, además su colocación se realiza de forma aleatoria cumpliendo determinadas características de densidad de colocación.

• TETRAPODOS:

El tetrápodo es un bloque de hormigón simple con cuatro patas cónicas truncadas proyectándose radialmente a partir de un punto central. Este modelo fue uno de los primeros en desarrollarse y patentarse en 1950 por Neypic Inc. De Francia. El mismo se presenta en la Figura 22.

**Fig. 22.** Defensa de Tetrapodos.

Al igual que los akmons, este tipo de unidades se disponen en mantos bicapa, siendo su colocación aleatoria.

- **CUBOS:**

Los cubos de piedra u hormigón fueron la primera alternativa artificial de uso en protecciones marítimas, la muestra defensas realizadas con cubos de hormigón. Los mismos se observa en la Fig. 23.

**Fig. 23.** Defensa de Cubos.

Las defensas ejecutadas con cubos se colocan normalmente en bicapas, la segunda capa actúa como separador de los bloques de la primera capa. Una colocación aleatoria es importante para los cubos a fin de garantizar la porosidad de la capa de armadura y evitar que los cubos se levanten por exceso de presión que se desarrolla dentro de la defensa, debido al oleaje.

Diseño de la sección transversal

Una escollera convencional está compuesta normalmente por una capa base y por un núcleo de rocas partidas, cubiertas por una o más capas de rocas más grandes y una o varias capas de roca de mayor tamaño o unidades de hormigón. Para el caso en análisis, se realiza una analogía de esta disposición, considerando que sólo se va tener un talud, sujeto a la acción del oleaje, no admitiendo sobrepaso, y a las estructuras viales existentes se las considera como núcleo a proteger.

El nivel de coronamiento de la capa protectora primaria será coincidente con el nivel de cordón cuneta que presenta actualmente el paquete estructural de la Av. Costanera. El ancho del coronamiento será el necesario para recubrir las capas internas.

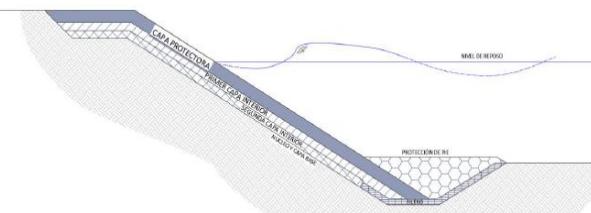
El talud de la defensa se extenderá desde el nivel de coronamiento, hasta la profundidad en donde se produce el cambio de pendiente del perfil de la playa, donde se inicia el fondo marino. Dado que la ubicación del punto de cambio de pendiente no es estática, ya que el perfil de la playa se modifica permanentemente como consecuencia del oleaje que se produce en la zona, se adopta la ubicación del punto de quiebre a partir del análisis de los relevamientos batimétricos ejecutados en el periodo 1996-2014 (ver Fig. 7).

Descripción del pie de la defensa

A la profundidad en la cual se ubica el cambio de pendiente, se desarrolla el pie de talud, punto de apoyo de la defensa. Este sitio, es un punto sensible dado que las condiciones en la intersección del talud con el fondo, puede ser críticamente inestables. El mismo tiene como objetivo no solo como soporte del borde inferior de la capa protectora, sino también de prevenir la erosión del material por debajo de la defensa por efectos de las corrientes horizontales y evitar la licuefacción de la arena causada por un abrupto gradiente vertical de presiones.

Se pueden construir dos tipos de protecciones del pie: protección excavada convencional y protección del tipo “revestimiento”. Para el caso de estudio, se propone una protección excavada convencional, ya que se disminuye la posibilidad de afectación del pie del talud, que como ya se ha expuesto, es un punto crítico para la estabilidad de la defensa.

En cuanto a las capas interiores, se debe tener un espesor mínimo de dos unidades, y éstas deben pesar alrededor de una décima parte del peso de las unidades que se hallan sobre ellas ($W/10$). Esta relación entre los pesos de la capa protectora primera y el peso de las unidades de las capas interiores dependerá de los elementos seleccionados (ver Fig. 24).

**Fig. 24.** Perfil tipo de protección continua.

Finalmente, aunque para el caso de estudio no se espera que exista sobrepaso de la estructura, para los escenarios de diseño analizados, se propone implementar un deflector de olas en el coronamiento de la defensa. Para su materialización se recomienda un deflector de hormigón con geometría análoga al perfil número 4 propuesto por (Ruiz y Zurvia Flores & Fragoso Sandova, 2012) con una altura de 1m. Complementariamente se sugiere verificar el diseño de la defensa y el deflector en un modelo físico.

En los siguientes apartados se presentan los parámetros adoptados, y las dimensiones de los componentes de la protección para cada alternativa.

Diseño de la defensa

La defensa tendrá una extensión de 300 m a partir del espigón corto, y se extenderá en el talud desde el nivel de costanera hasta encontrar la cota de fundación (nivel +1.67). Considerando el talud de playa relevado en el año 2014, y los relevamientos realizados durante el corriente año, se estableció que la defensa se asiente sobre un talud de 5. 71° (pendiente 10%), estando este valor muy próximo al talud natural de la playa. En aquellos sectores en donde se ha producido erosión, se deberá restituir el mismo, a través de la colocación de material de relleno, para establecer el asiento de la defensa. La extensión areal de la protección se puede ver en la Fig. 25 y Fig. 26.



Fig. 25. Extensión de la defensa.

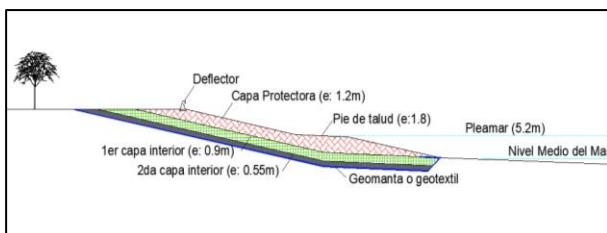


Fig. 26. Perfil transversal de defensa continua.

Alternativas de protección

Se plantearon tres alternativas considerando distintos tipos de elementos de hormigón para construir la capa protectora. Se proyectan dos capas internas, constituidas de bloques de hormigón, para todas las alternativas, y la dimensión de los bloques componentes, se calculó en relación a la capa protectora. Sobre el talud de playa, se proyecta la colocación de geomantas o geomembranas, que eviten la migración de partículas a través de los intersticios que presenta la defensa.

El peso de las unidades componentes de la capa protectora son calculados utilizando las fórmulas de Hudson e Iribarren. Para todos los casos, se adopta como peso final el calculado a través de la fórmula de Hudson, considerando una altura significativa de la ola de 2.2 m, siendo este valor, cercano a una ola de 50 años de recurrencia.

Se presenta a continuación en la Fig. 27 la alternativa elegida y la Tabla 4.

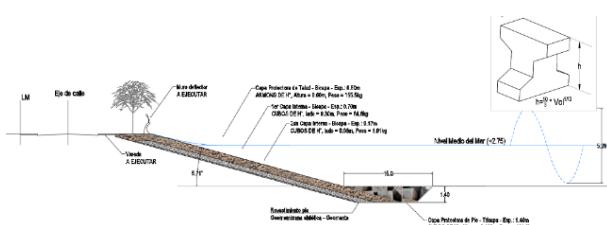


Fig. 27. Perfil transversal de defensa continua.

TABLA 5. Tabla resumen componentes de la estructura.

Capa	Unidad seleccionada	Capas componentes (n)	Peso de celda unidad (kg)	Volume n de cada unidad (m³)	Altura de cada unidad (m)	Espesor de capa (m)
Protectora	Akmons	2	617.31	0.26	0.95	1.27
1er capa interna	Cubos de Hº	2	153.60	0.06	0.40	0.90
2da capa interna	Cubos de Hº	2	4.15	0.00	0.12	0.26

Protección a largo plazo

Para estabilizar el proceso de erosión en el sector sur de Playa Unión se propone la construcción de una serie de espigones los cuales tienen como objetivo retener los sedimentos transportados por las corrientes litorales en el sector sur de cada uno de ellos para estabilizar el proceso de erosión.

Un espigón es una estructura que se extiende dentro del agua a los efectos de dirigir y confinar el flujo de marea, y es utilizado para prevenir o reducir erosión que se produce a raíz del arrastre marítimo. La efectividad de los espigones depende básicamente de un buen diseño a saber: longitud, coronamiento, ángulo respecto a la corriente, espaciamiento, material de construcción, mantenimiento, etc.

La geometría de un espigón presenta dos sectores bien diferenciados: el cuerpo y el morro. El morro es donde se inicia la estructura, en la zona más profunda del espigón, y en contra el impactan inicialmente las olas. El cuerpo del espigón es la zona situada entre la costa y el morro. El cuerpo del espigón puede ser una estructura permeable o impermeable, y puede admitir o no el sobre paso de olas, dependiendo cuál es el objetivo por el cual se construye el espigón. El cuerpo del espigón está compuesto, al igual que las defensas continuas, por una o varias capas protectoras (coraza), uno o más capas internas, y un núcleo.

La ubicación de cada uno de los espigones fue definida a partir de la línea en planta de equilibrio de playa definida en el apartado para la situación actual. En la Figura 28 se presenta la ubicación en planta de los 5 espigones propuestos. Las obras proyectadas se desarrollan lo largo de 2.8km de playa y tiene una separación variable entre 400 m aproximadamente en la zona sur, es decir entre los espigones ubicados cerca del espigón existente, y un espaciamiento de aproximadamente 800 m entre los espigones 4 y 5 ubicados al norte.



Fig. 28. Ubicación de obras de protección propuestas a largo plazo.

En la Figura 29 se presenta un esquema del morro proyectado en el cual se puede visualizar la protección al píe, la capa protectora primaria y secundaria, la capa interior y el geotextil. En la misma Figura 29 se presenta un corte tipo del cuerpo del espigón con sus respectivas capas protectoras, interior y geotextil.

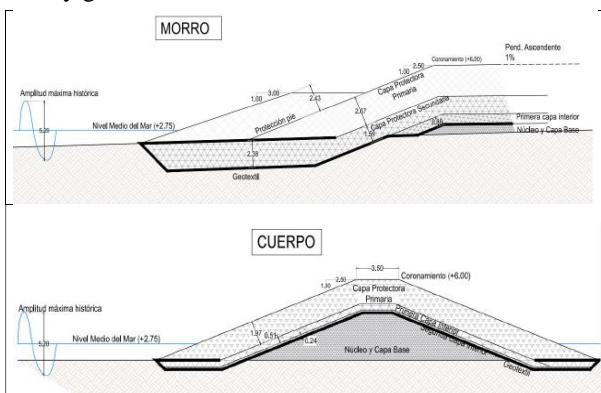


Fig. 29. Corte longitudinal tipo del morro de los espigones y Corte tipo del cuerpo de los espigones.

Para el diseño de la sección transversal del cuerpo y del morro del espigón se realizó siguiendo los mismos lineamientos utilizados para el diseño de la protección continua de elementos premoldeados, presentada en el punto anterior. Estos elementos trabajan estructuralmente basándose en el peso de las unidades y la trabazón entre las mismas.

CONCLUSIONES

Finalmente, luego de haber realizado el trabajo expuesto, se han obtenido conclusiones que servirán para futuros trabajos, las cuales se describen a continuación:

- Al momento de finalizar este trabajo, los autores encontraron pocos trabajos antecedentes con tema relacionados a defensas costeras a nivel nacional para apoyar el trabajo.

- Una de las ventajas ha sido la gran cantidad de datos históricos disponibles, gracias a esto se ha podido recopilar y analizar antecedentes de la zona de estudio para la posterior interpretación de la dinámica costera actual de Playa Unión e identificar las principales causas del proceso de erosión en la zona. Una fuente importante para obtener esta información fue el libro publicado por el Ingeniero Alberto A. Lagrange titulado “Mar, playas y puerto”, en el cual cuenta a través de relatos de los primeros pobladores de la zona como se conformaba la playa y cómo fue su evolución.
- Los beneficios que otorga la implementación de un modelo numérico para obtener parámetros de diseño. Esto permitió generar la propagación del oleaje que conduce hacia el escenario extremo del evento de rotura, y luego, con la posterior verificación, se han podido comparar los datos históricos disponibles, para finalmente diseñar la estructura de defensa.
- Dado que para el diseño se ha utilizado la fórmula de Hudson, la cual es una metodología de cálculo sencilla, pero que emplea el coeficiente “Kd”, el cual presenta gran incertidumbre, por lo que resulta necesario establecer con modelos físicos el valor de éste, para disminuir el error de cálculo, y consecuentemente, aumentar el coeficiente de seguridad de la estructura.

Como comentario final, el diseño se verificará con un modelo físico con oleaje irregular en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, el cual será descripto en un futuro artículo (PARTE II).

AGRADECIMIENTOS

Se agradece toda la ayuda brindada por el personal docente y no docente del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba.

REFERENCIAS

- [1] Beltrán, V. J., & Granada , J. C. (2016). Erosión marina en Playa Unión (Chubut - Republica Argentina): Análisis Geohistórico y Respuesta orientadas a su Estabilización. Párrafos Geográficos, Volumen 15, Nº 2.
- [2] Hidroeléctrica Ameghino S.A. (2011). Estudio de colmatación en el colmatación en el Embalse Florentino Ameghino (Provincia de Chubut). Trelew, Chubut, Argentina.
- [3] Hudson, R. Y. (1953, 1959, 1961). Wave forces on breakwaters. Transactions of the American Society of Civil Engineers.
- [4] Iribarren, R. (1938). Una fórmula para el cálculo de los diques de escollera.
- [5] Losada, M. A., Desire, J. M., & Alejo, L. M. (1986). Stability of blocks as breakwater armor units. Journal of Structural Engineering (United States).
- [6] Ruiz y Zurvia Flores, J. R., & Fragoso Sandova, L. (2012). Deflectores de oleaje para rompeolas superficiales rebasables. Tecnología y Ciencia del Agua, vol. III, num. 4, octubre-diciembre de 2012, pp 57-71.
- [7] US Army Coastal Engineering Research Center. (1973). Shore Protection Manual (Vol. 1).
- [8] Lagrange, A. A. (1993). Mar, playas y puerto: desde Mar del Plata una visión diferente. Fundación Bolsa de Comercio de Mar del Plata.

- [9] Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. (2018). *Coastal engineering: processes, theory and design practice*. CRC Press.
- [10] Juul Jensen, O. (1984). A monograph on rubble mound breakwaters.
- [11] Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering* (Vol. 7). World Scientific.