

Proventos IMFIA – Fluvial y Marítima

Convenio FJR – MA para el estudio de las medidas de adaptación al cambio climático de la playa de Piriápolis

Informe Final

<u>Documento:</u>	Informe_Final_v4.docx	v 4.0
<u>Fecha de envío:</u>	6/6/2024	
<u>Autores:</u>	Sebastián Solari Paula Gurruchaga Lucas Sellanes	
<u>Contraparte:</u>	Ministerio de Ambiente	

INDICE

1	Introducción	5
2	Antecedentes	6
3	Viento y clima marítimo	7
3.1	Datos utilizados.....	7
3.2	Viento.....	7
3.3	Nivel de mar.....	9
3.4	Oleaje	10
3.4.1	Propagación al sitio	10
3.5	Caracterización estadística del clima marítimo	12
3.5.1	Régimen medio de viento	12
3.5.2	Régimen medio y extremo de nivel de mar	12
3.5.3	Régimen medio y extremo de oleaje.....	14
3.5.4	Régimen conjunto de altura de ola significativa y nivel de mar	16
4	Diagnóstico de la situación actual	17
4.1	Análisis a corto plazo	17
4.1.1	Perfiles analizados	17
4.1.2	Tormentas de cálculo	20
4.1.3	Resultados	23
4.2	Análisis a mediano plazo.....	27
4.2.1	Obras portuarias y litorales presentes en el arco de playa	27
4.2.2	Evolución de la línea de costa previo a 1979	28
4.2.3	Evolución de la línea de costa en el período 1985-2022.....	30
4.2.4	Estimación de profundidad de cierre y transporte litoral	37
4.2.5	Balance de sedimentos del arco de playa	41
4.3	Análisis a largo plazo.....	43
4.4	Resumen de situación actual (línea base)	48
5	Proyección de evolución de la línea de costa y cambio en las amenazas de erosión e inundación costera.....	50
5.1	Retroceso de la línea de costa por aumento del nivel medio del mar	52
5.2	Análisis a corto plazo en escenarios de cambio climático: cambios en la amenaza de erosión e inundación costera	57
5.3	Resumen de situación proyectada.....	60
6	Propuesta de alternativas	61

6.1	Consideraciones preliminares respecto a potenciales estrategias.....	64
6.1.1	No hacer nada	64
6.1.2	Retiro	65
6.1.3	Protección (mantener la línea).....	65
6.1.4	Avanzar la línea de costa	65
6.1.5	Intervenciones limitadas	66
6.2	Definición de alternativas	67
6.2.1	Alternativa A – Intervenciones limitadas	68
6.2.2	Alternativa B – Avance y estabilización de la línea de costa	68
6.2.3	Respecto a la posible fuente de arena para la alternativa 2	69
6.2.4	Reunión del 23 de febrero de 2024 para discusión de alternativas.....	70
7	Prediseño de alternativas.....	75
7.1	Generalidades respecto al diseño en planta del relleno de arena y las obras litorales 75	
7.2	Generalidades respecto al diseño en alzado y la verificación de las obras litorales .	76
7.2.1	Materiales y aspectos constructivos	76
7.2.2	Requisitos de diseño.....	77
7.2.3	Estados de mar considerados.....	80
7.2.4	Modos de fallo y ecuaciones de verificación.....	81
7.3	Generalidades respecto al perfil y el relleno de playa	82
7.3.1	Perfil de diseño	82
7.3.2	Volumen a colocar en sitio y a extraer de la zona de préstamo	83
7.3.3	Procedimiento constructivo y perfil de relleno.....	83
7.3.4	Recomendaciones para la caracterización de la zona de préstamo	84
7.4	Generalidades respecto al plan de monitoreo y seguimiento.....	86
7.4.1	Perfiles de playa	86
7.4.2	Granulometría de arena	87
7.4.3	Fotografías aéreas	87
7.4.4	Oleaje y nivel de mar	87
7.5	Alternativa 01 – Diques exentos	88
7.5.1	Configuración en planta	88
7.5.2	Secciones tipo de las obras litorales.....	90
7.6	Alternativa 2	92
7.6.1	Configuración en planta	92

7.6.2	Secciones tipo de las obras litorales.....	94
7.7	Comparativa de alternativas.....	96
7.8	Consideraciones finales	97
Anexo 1 – Información Topo-Batimétrica proporcionada por la Intendencia de Maldonado ...		99

1 Introducción

El presente informe resume los trabajos realizados y los resultados alcanzados en la ejecución del convenio firmado entre la FJR y el MA “Implementación de medidas de adaptación en la zona costera de Uruguay en el marco del NAP COSTAS”, del 1ro de Junio de 2023.

El documento se estructura de la siguiente forma. En la sección 3 se presenta la caracterización del clima marítimo y de viento en la zona, con especial atención a los principales agentes forzantes del sistema: oleaje y nivel de mar. En la sección 4 se aborda el diagnóstico de la dinámica actual de la playa, realizando un análisis de su comportamiento a corto, mediano y largo plazo. Luego, en la sección 5 se cuantifica cuál sería el efecto esperable de las proyecciones de cambio climático sobre la dinámica de la playa ya caracterizada previamente. En la sección 6 se discuten a nivel conceptual distintas alternativas de intervención tendientes a atender la problemática actual de la playa y a su adaptación ante el cambio climático. En la sección 7 se presenta el prediseño hidráulico de dos alternativas, seleccionadas a partir del análisis en conjunto con la contraparte de las alternativas propuestas a nivel básico.

Este documento está acompañado de las siguientes láminas:

- L1: Alternativa 1 – Planta
- L2: Alternativa 1 – Cortes
- L3: Alternativa 2 – Planta
- L4: Alternativa 2 – Cortes

2 Antecedentes

En lo que respecta a antecedentes, los más relevantes a efectos de este estudio son:

[1] **“Conservación y mejora de playas – URU. 73.007”** (1979) Ministerio de Transporte y Obras Públicas – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – UNESCO.

[2] **“Estudio de la zona costera del balneario Piriápolis. Informe Final”** (2009) Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Este informe actualiza estos antecedentes, y en particular el informe del IMFIA de 2009, en varios aspectos relevantes:

- Se utiliza información no disponible previamente, a saber: información respecto a los agentes forzantes del sistema (reanálisis de oleaje de alta resolución espacial y temporal; reanálisis de nivel de mar), información respecto a cómo ha evolucionado la playa en el tiempo (líneas de costa obtenidas del procesamiento de las series históricas de imágenes satelitales de las misiones Landsat y Sentinel), e información tomada en sitio por la Intendencia de Maldonado (relevamientos topo-batimétricos de detalle y muestreos de arena en el fondo del lecho). Esta información permite alcanzar un diagnóstico del comportamiento del sistema mejor y más detallado del obtenido previamente.
- Se incorpora el uso de herramientas, conocimientos y conceptos del estado del arte actual, algunas no disponibles o inexistentes hace más de 15 años.

A su vez, a diferencia de los informes previos, en este trabajo se analiza cuáles son los efectos esperables del cambio climático en la dinámica de la playa, y se proponen medidas tendientes no solo a atender los problemas actuales de la playa, sino a adaptarla al aumento del nivel medio del mar.

3 Viento y clima marítimo

3.1 Datos utilizados

Se utilizan las siguientes series de datos:

- Viento y oleaje del reanálisis global ERA5.
- Viento medido en Pontón de Recalada.
- Nivel de mar medido por DNH/DINAGUA en el Puerto de Piriápolis.
- Nivel de mar del hindcast global GTSM.
- Nivel de mar del hindcast local generado por el IMFIA.

3.2 Viento

Se utiliza el viento del reanálisis ERA-5 correspondiente al nodo (35°S,55.25°W). Estos datos son de paso horario, con velocidad de viento asimilable a media en 10 minutos medida a 10 m de altura ($V_{10m,10min}$).

Para la validación de estos datos se utiliza la información de viento medida en Pontón de Recalada; la Figura 1 presenta la localización de esta estación, junto con el nodo de viento de ERA5 usado en este trabajo. La Figura 2 presenta una comparación de cuantiles de la velocidad de viento del reanálisis con la velocidad de viento medida, mientras que Figura 3 presenta los histogramas de frecuencia de la dirección de procedencia del viento para ambas series. Se observa que los datos del modelo ERA5 reproducen muy bien las direcciones de viento registradas en Pontón de Recalada, pero tienden a subestimar las velocidades de viento mayores a 9 m/s.

Una alternativa posible, que se ha aplicado en otros proyectos, es realizar una corrección de las velocidades de viento del modelo ERA5 mediante una técnica de tipo “*quantile mapping*” direccional; sin embargo, dado que el viento en este proyecto no interesa per se, sino como insumo para el cálculo del oleaje, y teniendo en cuenta que no se dispone de medidas de oleaje en sitio para verificar cómo la corrección del viento estaría afectando al clima de ola en la playa de Piriápolis, se opta por no corregir las velocidades de viento y trabajar con los valores proporcionados por el modelo global ERA5, los cuales son consistentes con las condiciones de contorno de oleaje que serán utilizadas en los apartados siguientes.

El principal riesgo de no corregir los datos de velocidad de viento es que se esté subestimando las condiciones de oleaje más severas y extremas, por lo que en etapas posteriores del proyecto se analizará la sensibilidad del clima de olas a la aplicación de la corrección de la velocidad de viento.



Figura 1 – Localización de Pontón de Recalada y del nodo de viento de ERA5 usado en este estudio.

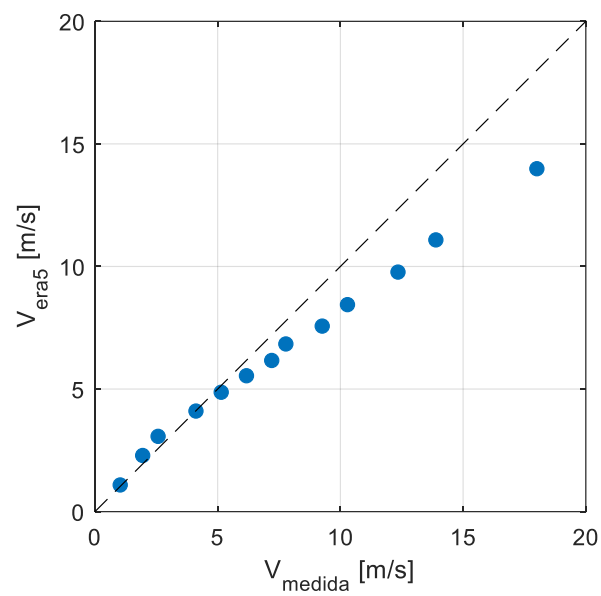


Figura 2 – Gráfico de cuantiles de velocidad de viento sin calibrar (datos simultáneos, $p = [1, 5, 10:90, 95, 99]$).

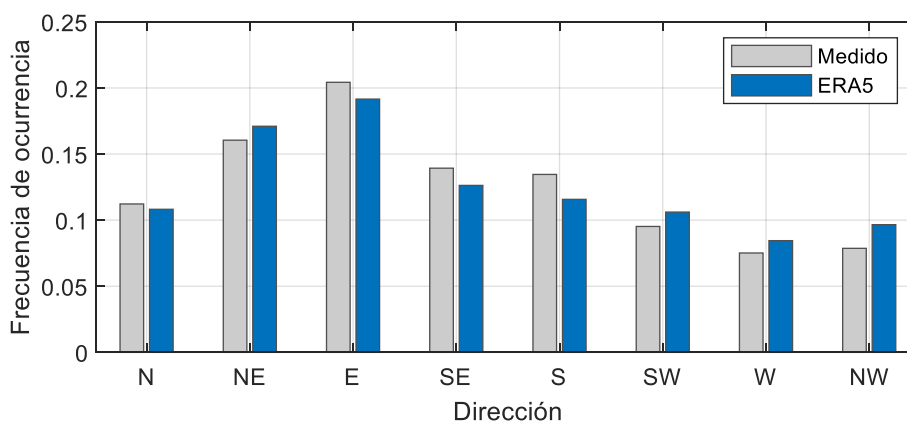


Figura 3 – Histogramas de frecuencia de dirección de viento contruidos usando únicamente datos simultáneos entre el reanálisis y las series medidas.

3.3 Nivel de mar

Se construye una serie continua de paso horario de nivel de mar en Piriápolis mediante el siguiente procedimiento:

1. Se toma la serie de datos de paso horario o menor, medida por DINAGUA en el puerto de Piriápolis entre 1986 y 2022, y en aquellos casos en que el registro se realiza con paso de tiempo menor al horario se toma para cada hora el promedio de los registros disponibles para dicha hora. Esta serie presenta datos faltantes en varios períodos.
2. Se utiliza la serie anterior para corregir mediante *quantile mapping* los datos del *hindcast* GTSM, obteniéndose una serie horaria sin datos faltantes para el período 1979-2018. La Figura 4 presenta la comparación de cuantiles de la serie de nivel de mar medido con la de nivel de mar del *hindcast* GTSM; se observa que una vez aplicada la corrección el *hindcast* reproduce adecuadamente los niveles de mar medidos.
3. Se completa la serie de datos corregidos GTSM con los datos medidos por DNH/DINAGUA del período 2018-2022. Cuando hay datos faltantes se completa la serie usando el nivel medio del mar.

Como resultado final se tiene una serie horaria de datos de nivel de mar que cubre el período 1979 hasta 2022 inclusive.

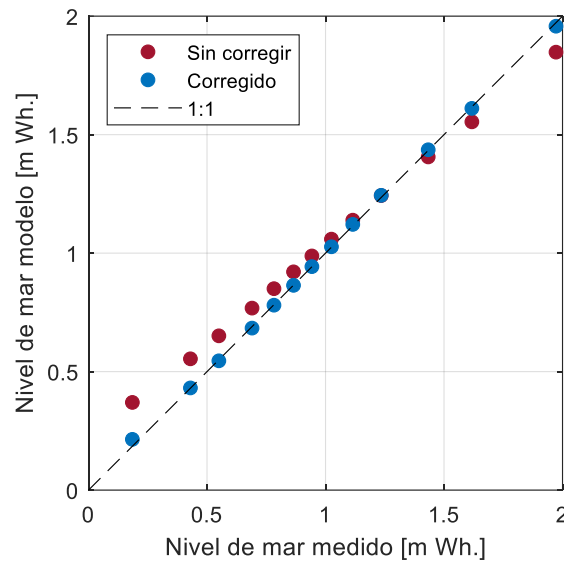


Figura 4 – Comparación de cuantiles de los datos de nivel de mar medidos y del *hindcast* GTSM sin corregir y corregido (probabilidades [1%,5%,10%,20%,...,90%,95%,99%]).

3.4 Oleaje

3.4.1 Propagación al sitio

Para la propagación del oleaje desde los nodos ERA5 hasta la zona de estudio se utiliza el modelo SWAN de generación y propagación de oleaje. La modelación se realiza utilizando tres mallas anidadas, con paso espacial de 500 m, 100 m y 20 m respectivamente (ver Figura 5).

No se tiene constancia de que existan datos de oleaje medidos en la zona que permitan calibrar y/o validar el modelo de oleaje, por lo que se utilizará la configuración por defecto del modelo.

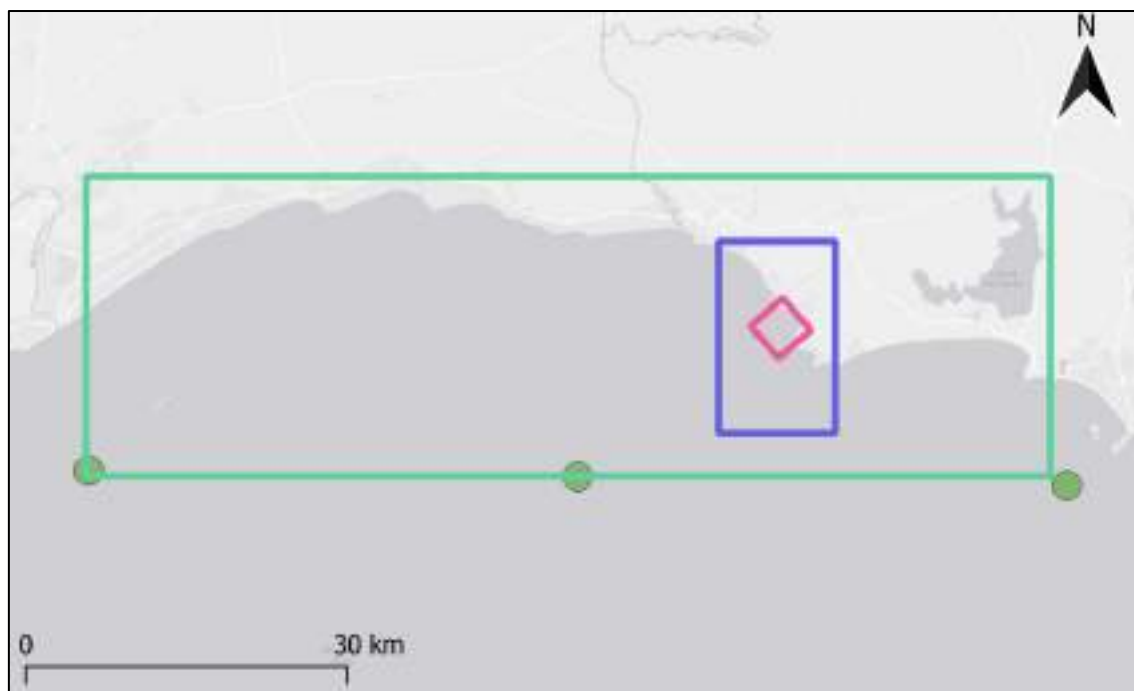


Figura 5 – Mallas utilizadas en el modelo SWAN para la propagación del oleaje.

3.5 Caracterización estadística del clima marítimo

3.5.1 Régimen medio de viento

La Figura 6 presenta el régimen medio de velocidad y dirección de viento (velocidad media en 10 minutos a 10 m de altura sobre la superficie del mar, según se describe en la sección 3.2) característico de la zona de estudio.

Vw-Dw	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-2	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.3%	0.3%	5%
2-4	1.3%	1.4%	1.5%	1.4%	1.5%	1.4%	1.2%	1.0%	0.9%	0.8%	0.8%	0.8%	0.7%	0.8%	0.9%	1.1%	17%
4-6	2.0%	2.6%	2.8%	2.7%	2.6%	2.4%	1.8%	1.5%	1.3%	1.1%	1.0%	1.1%	1.0%	1.1%	1.5%	1.7%	28%
6-8	1.3%	2.0%	2.9%	3.0%	2.9%	2.1%	1.5%	1.5%	1.4%	1.2%	1.1%	1.0%	0.9%	1.1%	1.4%	1.3%	26%
8-10	0.3%	0.5%	1.2%	1.9%	1.8%	0.9%	0.8%	1.0%	1.2%	1.1%	1.0%	0.9%	0.6%	0.6%	0.7%	0.4%	15%
10-12	0.0%	0.1%	0.2%	0.5%	0.4%	0.3%	0.3%	0.4%	0.6%	0.7%	0.7%	0.6%	0.4%	0.2%	0.2%	0.1%	6%
12-14	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.2%	0.3%	0.3%	0.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	2%
14-16			0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	1%
16-18			0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0%
18-20				0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		0%
20-22									0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%			0%
22-24											0.0%	0.0%	0.0%	0.0%			0%
Total	5%	7%	9%	10%	10%	8%	6%	6%	6%	6%	5%	5%	4%	4%	5%	5%	100%

Figura 6 – Frecuencia media anual de velocidad (m/s) y dirección de viento sobre el mar, a partir de la serie de ERA5 en el nodo (35°S,55.25°W).

3.5.2 Régimen medio y extremo de nivel de mar

La Figura 7 presenta la distribución de probabilidad acumulada empírica (régimen medio) del nivel de mar en Piriápolis. Esta distribución está construida a partir de la serie de datos que combina los datos medidos y los provenientes del *hindcast* GTSM, descrita en la sección 3.3.

Por otro lado, para estimar el régimen extremo de nivel de mar se considera que resulta más adecuado usar la serie de máximos anuales de niveles de mar medidos en el puerto de Piriápolis que la serie horaria reconstruida descrita en la sección 3.3. Por un lado, los datos de *hindcast* pueden tener errores en los eventos puntales, que si bien no generan inconvenientes cuando se trabaja con toda la información (como es el caso del régimen medio) sí pueden generar algún sesgo cuando se trabaja solo con algunos eventos seleccionados (como es el caso del régimen extremo); por otro lado, la serie de máximos anuales medidos cubre un período de tiempo mayor que las series horarias medidas y que el *hindcast*, lo que redundará en una reducción en la incertidumbre en la caracterización del régimen de extremos.

Para la caracterización del régimen de extremos de nivel de mar en puerto se ajusta una distribución de extremos generalizada (GEV) y una Gumbel a la serie de máximos anuales medida en Piriápolis por DNH/DINAGUA, utilizando el método de los momentos L para estimar los parámetros de la distribución y la técnica de *bootstrapping* no paramétrica para la estimación de los límites del intervalo de confianza de 90%. La Figura 8 presenta el régimen de extremos de nivel de mar obtenido.

Se observa que tanto la GEV como la Gumbel proporcionan un buen ajuste a los datos, aunque la Gumbel parece ajustar mejor los tres eventos más severos de los que se tiene registro. Dado que no hay evidencia estadística para descartar el uso de la Gumbel en favor de la GEV, y que el uso de la Gumbel, y que la Gumbel resulta en valores de alto período de retorno algo más

conservadores que los obtenidos con la GEV, en el resto del estudio se utilizará la Gumbel para caracterizar la distribución de extremos del nivel de mar.

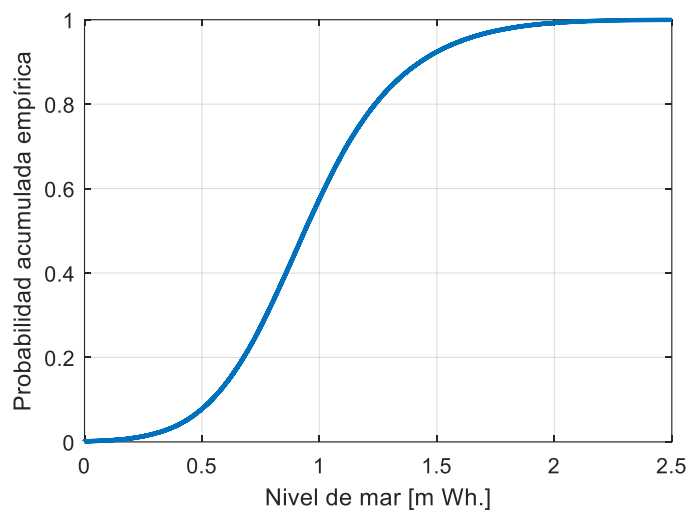


Figura 7 – ECDF de la serie de nivel de mar en Piriápolis, construida en la sección 3.3 (para el cálculo de la probabilidad empírica no se tienen en cuenta los datos faltantes rellenados con el nivel medio del mar).

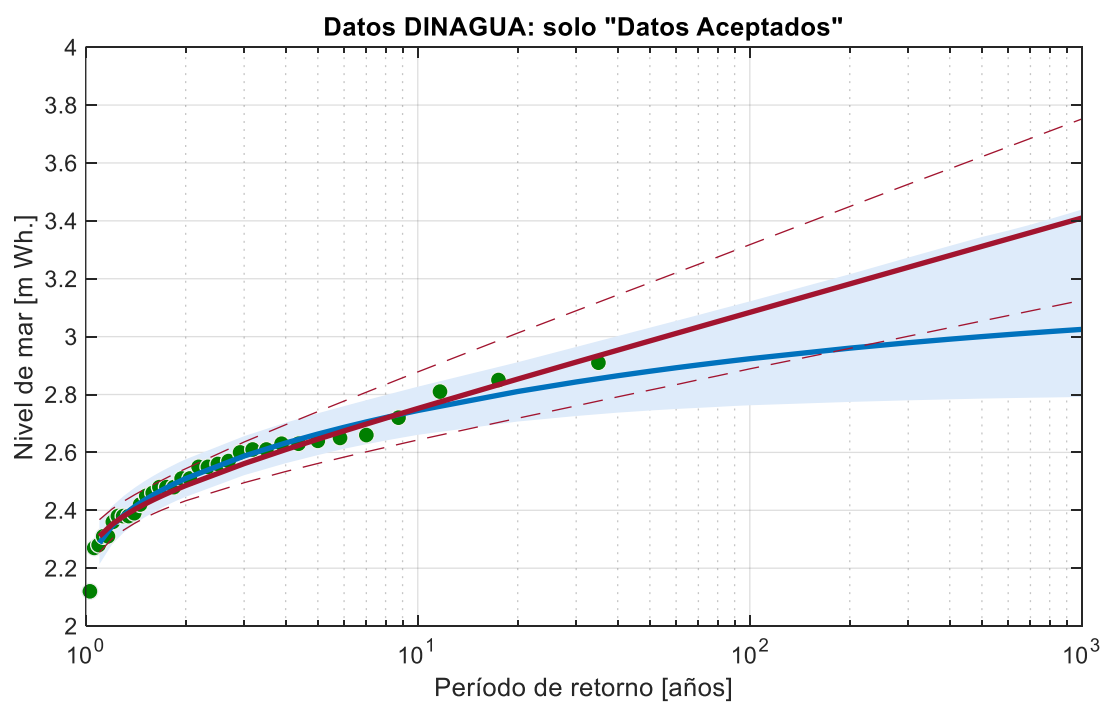


Figura 8 – Régimen de extremos del nivel de mar en Piriápolis, estimado a partir de la serie de máximos anuales medida por DNH/DINAGUA en el puerto de Piriápolis, utilizando únicamente los datos que DINAGUA señala como “dato aceptado”.

3.5.3 Régimen medio y extremo de oleaje

Para la etapa de diagnóstico y diseño de alternativas se utilizará el oleaje propagado hasta distintos puntos ubicados a lo largo del arco de playa (PIR01 a PIR35) y en tres puntos ubicados en la línea imaginaria que une el puerto de Piriápolis con Punta de los Burros (OS01 a OS03); la Figura 9 muestra la ubicación de estos puntos. A efectos de resumir el régimen medio y extremo de oleaje en la zona, en este informe se presentan únicamente los resultados correspondientes al nodo “OS02”.

A continuación, se presentan el régimen medio anual conjunto de ocurrencia de: altura de ola significativa y dirección media (Figura 10), altura de ola significativa y período medio (Figura 11), y período medio y dirección media (Figura 12). Por último, la Figura 13 presenta el régimen de extremos de altura de ola significativa, obtenido mediante el método de picos sobre el umbral, usando el método de los momentos L para estimar los parámetros de la distribución Exponencial, y la técnica de *bootstrapping* no paramétrica para la estimación de los límites del intervalo de confianza de 90%.



Figura 9 – Ubicación de nodos de referencia en los que se saca el oleaje frente para el estudio de la playa de Piriápolis.

Hs-Dm	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0-0.5	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	0.6%	2.7%	10.7%	17.2%	10.4%	5.7%	3.7%	1.7%	0.6%	0.2%	0.1%	54%
0.5-1.0	0.0%			0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	2.1%	12.5%	9.7%	4.5%	2.3%	0.6%	0.1%	0.0%	0.0%	32%
1.0-1.5							0.0%	0.1%	1.8%	5.0%	1.8%	0.5%	0.1%	0.0%	0.0%		9%
1.5-2.0								0.0%	0.2%	1.8%	0.8%	0.2%	0.0%	0.0%			3%
2.0-2.5									0.0%	0.6%	0.4%	0.1%	0.0%				1%
2.5-3.0									0.0%	0.2%	0.2%	0.0%					0%
3.0-3.5									0.0%	0.0%	0.0%	0.0%					0%
3.5-4.0									0.0%	0.0%	0.0%	0.0%					0%
4.0-4.5										0.0%	0.0%						0%
4.5-5.0										0.0%	0.0%						0%
Total	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	13%	32%	28%	14%	7%	2%	1%	0%	0%	100%

Figura 10 – Frecuencia media anual conjunta de altura de ola significativa y dirección media en el nodo OS02.

Hs-Tm	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
0-0.5	0.3%	2.9%	9.4%	14.8%	13.1%	7.9%	3.8%	1.4%	0.4%	0.1%	0.0%	54%
0.5-1.0	0.1%	1.1%	4.8%	7.1%	6.9%	5.5%	3.6%	1.8%	0.8%	0.2%	0.1%	32%
1.0-1.5	0.0%	0.1%	0.9%	3.0%	2.8%	1.4%	0.5%	0.2%	0.1%	0.1%	0.0%	9%
1.5-2.0		0.0%	0.1%	0.8%	1.4%	0.7%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3%
2.0-2.5			0.0%	0.1%	0.6%	0.4%	0.1%	0.0%				1%
2.5-3.0				0.0%	0.1%	0.2%	0.0%	0.0%				0%
3.0-3.5					0.0%	0.1%	0.0%					0%
3.5-4.0						0.0%	0.0%					0%
4.0-4.5						0.0%	0.0%	0.0%				0%
4.5-5.0							0.0%	0.0%				0%
Total	0%	4%	15%	26%	25%	16%	8%	3%	1%	0%	0%	100%

Figura 11 – Frecuencia media anual conjunta de altura de ola significativa y período medio en el nodo OS02.

Tm-Dm	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
2	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0%
3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.2%	0.2%	0.3%	0.5%	0.6%	0.8%	0.7%	0.3%	0.1%	0.0%	4%
4	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.3%	0.9%	1.7%	2.5%	3.2%	2.5%	2.3%	1.2%	0.3%	0.1%	0.0%	15%
5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	1.3%	4.2%	5.7%	6.9%	4.4%	2.6%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	26%
6					0.0%	0.0%	0.3%	4.1%	7.9%	7.8%	3.8%	1.0%	0.0%	0.0%			25%
7						0.0%	0.0%	1.8%	7.2%	5.3%	1.7%	0.1%	0.0%				16%
8							0.0%	0.6%	4.6%	2.6%	0.5%	0.0%					8%
9							0.0%	0.2%	2.3%	0.9%	0.1%						3%
10								0.1%	0.9%	0.3%	0.0%						1%
11								0.0%	0.3%	0.1%							0%
12								0.0%	0.1%	0.0%							0%
Total	0%	0%	0%	0%	0%	1%	3%	13%	32%	28%	14%	7%	2%	1%	0%	0%	100%

Figura 12 – Frecuencia media anual conjunta de período y dirección medias en el nodo OS02.

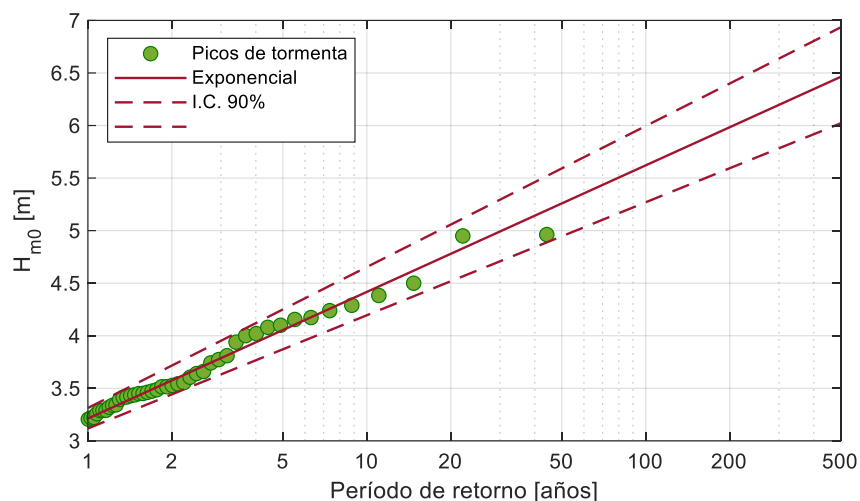


Figura 13 – Régimen de extremos de altura de ola significativa en el nodo OS02.

3.5.4 Régimen conjunto de altura de ola significativa y nivel de mar

La Figura 14 presenta el régimen medio anual conjunto de altura de ola significativa en el punto “OS02” y el nivel de mar en el puerto de Piriápolis (referido al cero Wharton).

Hs-SL	-0.5 a 0	0 a 0.1	0.5 a 1	1 a 1.5	1.5 a 2	2 a 2.5	2.5 a 3	3 a 3.5	Total
0-0.5	0.1%	6.2%	34.8%	12.7%	0.1%				54%
0.5-1.0	0.0%	1.3%	14.5%	14.9%	1.3%	0.0%			32%
1.0-1.5		0.0%	1.1%	5.4%	2.6%	0.0%			9%
1.5-2.0		0.0%	0.1%	1.0%	1.8%	0.2%			3%
2.0-2.5			0.0%	0.1%	0.7%	0.2%	0.0%		1%
2.5-3.0			0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	0.0%		0%
3.0-3.5			0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%		0%
3.5-4.0			0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%		0%
4.0-4.5					0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0%
4.5-5.0							0.0%	0.0%	0%
Total	0%	8%	51%	34%	7%	1%	0%	0%	100%

Figura 14 – Frecuencia media anual conjunta de altura de ola significativa en el nodo OS02 y nivel de mar medido en Piriápolis (referido al 0 Wharton).

4 Diagnóstico de la situación actual

El análisis de la dinámica de la playa se aborda diferenciando entre las distintas escalas temporales características de estos sistemas: corto plazo (apartado 4.1; i.e. respuesta de la playa eventos de tormenta; esta es una dinámica fundamentalmente relacionada con el comportamiento del perfil de la playa), mediano plazo (apartado 4.2; i.e. comportamiento es escala anual-decadal; en esta categoría se consideran las tasas de transporte medio anual de sedimentos, así como la evolución reciente y la variabilidad interanual de la posición de la línea de costa), y por último el largo plazo (apartado 4.3), en el cual se incluyen los condicionantes geológicos impuestos al sistema y los posibles equilibrios del sistema en escalas de siglos (sin considerar efectos del cambio climático, los que se analizan en la sección 5).

El análisis de estas tres escalas temporales permite construir un diagnóstico de la situación actual de la dinámica de la playa, el cual se presenta en el apartado 4.4.

4.1 *Análisis a corto plazo*

En este apartado se analiza la respuesta de la playa ante eventos extremos de oleaje y nivel de Mar. Para esto se utiliza el modelo numérico X-Beach en su versión 1D (perfil de playa), implementado en tres perfiles de playa representativos, para modelar la erosión del perfil de playa que sería esperable tener en eventos de 10 y 100 años de período de retorno.

4.1.1 Perfiles analizados

Para el análisis de la respuesta a corto plazo de la playa se seleccionan los perfiles 5, 30 y 62. La Figura 5 presenta la ubicación espacial de los perfiles seleccionados. La numeración de los perfiles es la utilizada en el análisis a mediano plazo mediante imágenes satelitales (ver Figura 27 en apartado 4.2.3). Los perfiles se construyen a partir de la información topo-batimétrica proporcionada por la Intendencia de Maldonado, combinando con información de IDE.uy cuando fue necesario (todos los datos fueron llevados a un mismo plano de referencia: cero Wharton).

El perfil 5 es representativo del tramo norte de la playa, en donde se cuenta con un sistema de dunas ancho y no hay antecedentes de que la erosión de la playa alcance la rambla (ver Figura 16). El perfil 30 es representativo del tramo central de la playa, en una zona en que la playa es angosta, no cuenta con dunas, y el agua alcanza sistemáticamente la rambla (ver Figura 17). Por último, el perfil 61 es representativo del tramo sur de la playa, en donde la playa es bastante más ancha que en el tramo central, pero no existe un sistema de duna entre la playa y la rambla (ver Figura 18). Se observa que la parte sumergida de los perfiles 5 y 30 es muy similar, ambos presentan un banco, aunque el del perfil 30 es más prominente que el del perfil 5, y ambos tiene una pendiente media prácticamente idéntica, en torno a 2.25%. El perfil 61 es claramente más tendido que los anteriores, tanto en su parte sumergida como en su parte emergida, con una pendiente media relativamente uniforme en ambos tramos, en torno a 1.4%.



Figura 15 – Ubicación de los perfiles de playa seleccionados para el análisis de la respuesta a corto plazo de la playa de Piriápolis.

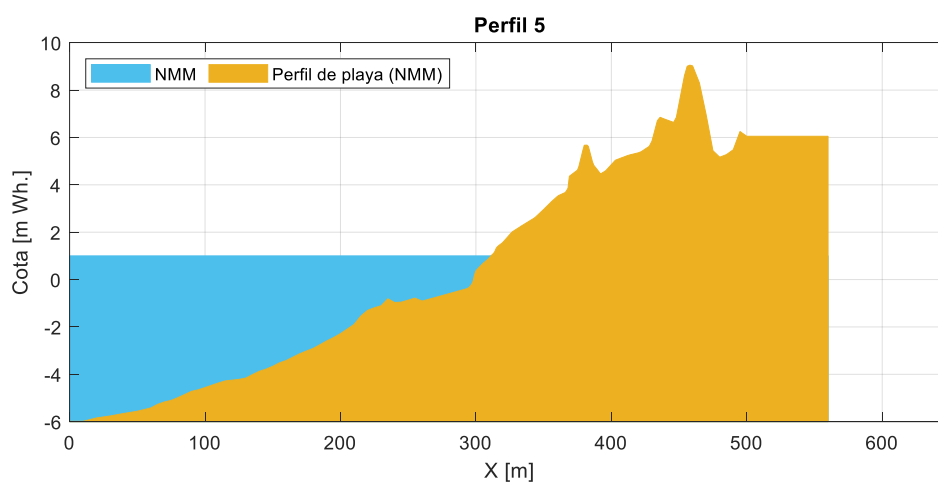


Figura 16 – Perfil de playa correspondiente la Perfil 5.

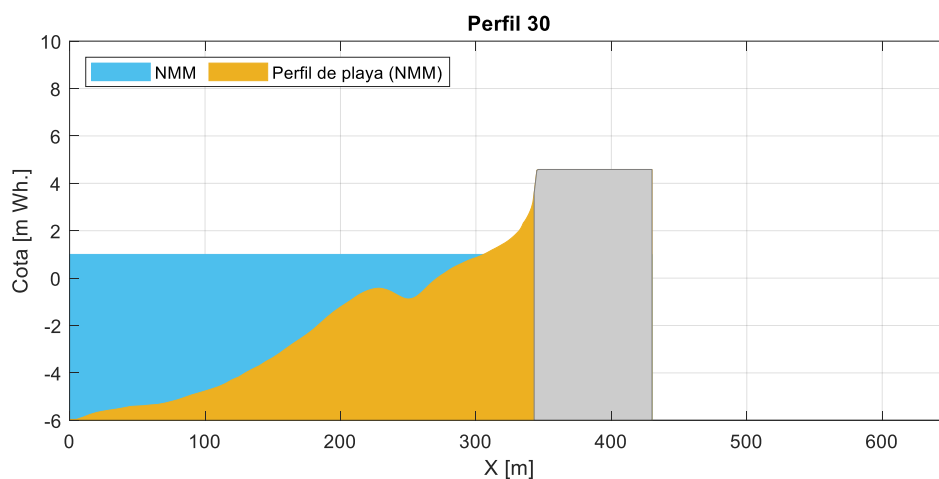


Figura 17 – Perfil de playa correspondiente al Perfil 30.

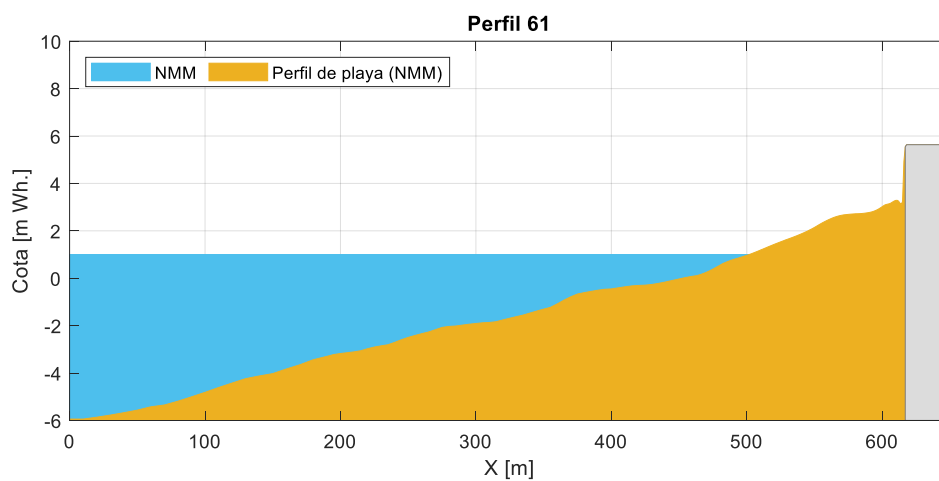


Figura 18 – Perfil de playa correspondiente al Perfil 61.

4.1.2 *Tormentas de cálculo*

Para cada perfil se construyen tormentas representativas de eventos de 10 y 100 años de período de retorno. Para ello se utiliza la información de oleaje del nodo más próximo a cada perfil (PIR07 para el perfil 5, PIR19 para el perfil 30 y PIR32 para el perfil 61; ver localización de los nodos en la Figura 9), junto con la información disponible de nivel de mar en el puerto de Piriápolis.

De la Figura 14 se desprende que existe una fuerte correlación entre la altura de ola significativa y el nivel de mar en la playa de Piriápolis (lo cual fue verificado también al analizar el oleaje de los nodos PIT07, PIR19 y PIR32). Por lo tanto, de cara a la construcción de las tormentas representativas de 10 y 100 años de período de retorno se asumirá que los extremos de altura de ola significativa y nivel de mar están totalmente correlacionados (i.e. una tormenta con altura de ola significativa de 10 años de período de retorno viene acompañada de un nivel de mar del mismo período de retorno). Esta hipótesis permite simplificar significativamente la construcción de las tormentas representativas de 10 y 100 años de período de retorno. La Tabla 1 lista las combinaciones de altura de ola significativa y nivel de mar para 10 y 100 años de período de retorno, correspondientes a cada perfil.

Para definir las tormentas de 10 y 100 años de período de retorno es también necesario de finir la duración de la misma, su forma, la simultaneidad o no de los picos de altura de ola significativa y nivel de mar, y el valor que toman el resto de las variables que definen el estado de mar: período pico y dirección pico. Para esto se analizan las diez mayores tormentas de las que se tiene registro en la serie de datos de oleaje, para cada uno de los nodos de oleaje utilizados.

Las diez mayores tormentas y la forma de la tormenta idealizada elegida para los nodos PIR07, PIR19 y PIR32 se presentan en la Figura 19, Figura 20 y Figura 21, respectivamente. Las tormentas idealizadas se construyen de la siguiente forma:

- la tormenta dura 48 horas,
- la evolución de las variables altura de ola significativa y nivel de mar es triangular, con el pico de ambas variables a las 24 horas de iniciada la tormenta, iniciando y finalizando en valores fijos que dependen de cada nodo,
- los valores pico de altura de ola significativa y nivel de mar se toman según el período de retorno correspondientes (ver Tabla 1),
- las variables dirección y período se asumen constante en el tiempo, dependientes únicamente del nodo.

Tabla 1 – Condiciones de 10 y 100 años de período de retorno para los distintos perfiles

	Tr 10 años	Tr 100 años
Hs nodo PIR07 – perfil 5	3,9 m	4,8 m
Hs nodo PIR19 – perfil 30	3,8 m	4,6 m
Hs nodo PIR32 – perfil 61	3,4 m	4,2 m
Nivel de mar	+2,8 m Wh.	+3,1 m Wh.

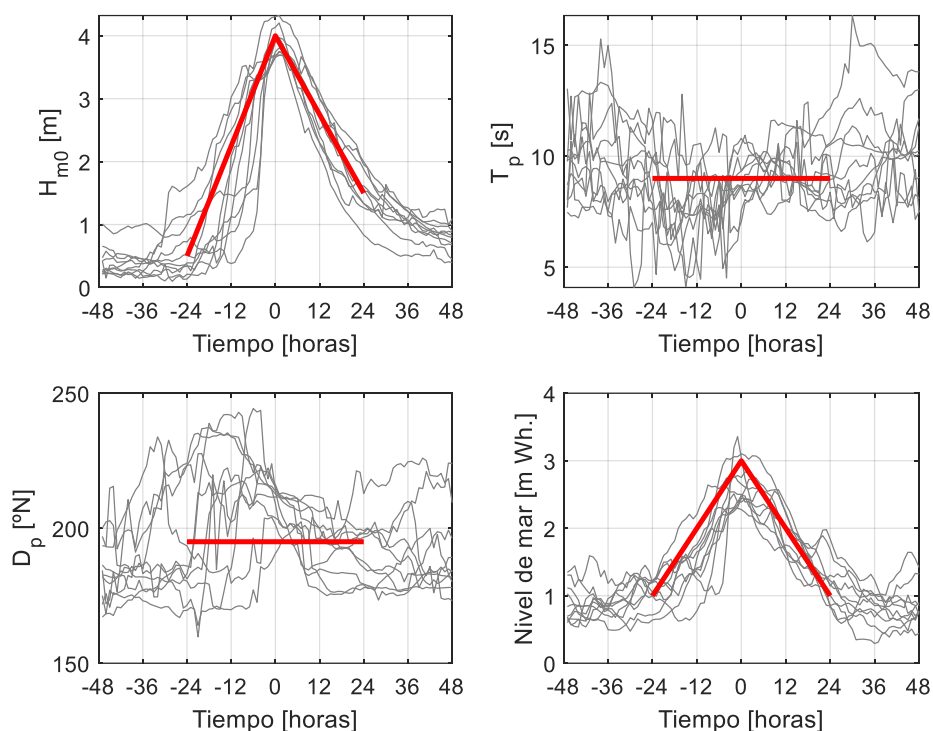


Figura 19 – Superposición de la evolución temporal de las variables H_{m0} , T_m , D_m y nivel de mar, para las diez tormentas de mayor H_{m0} registradas en el nodo PIR07 (en gris), junto con la forma de la tormenta idealizada utilizada en la simulaciones con X-Beach (en rojo).

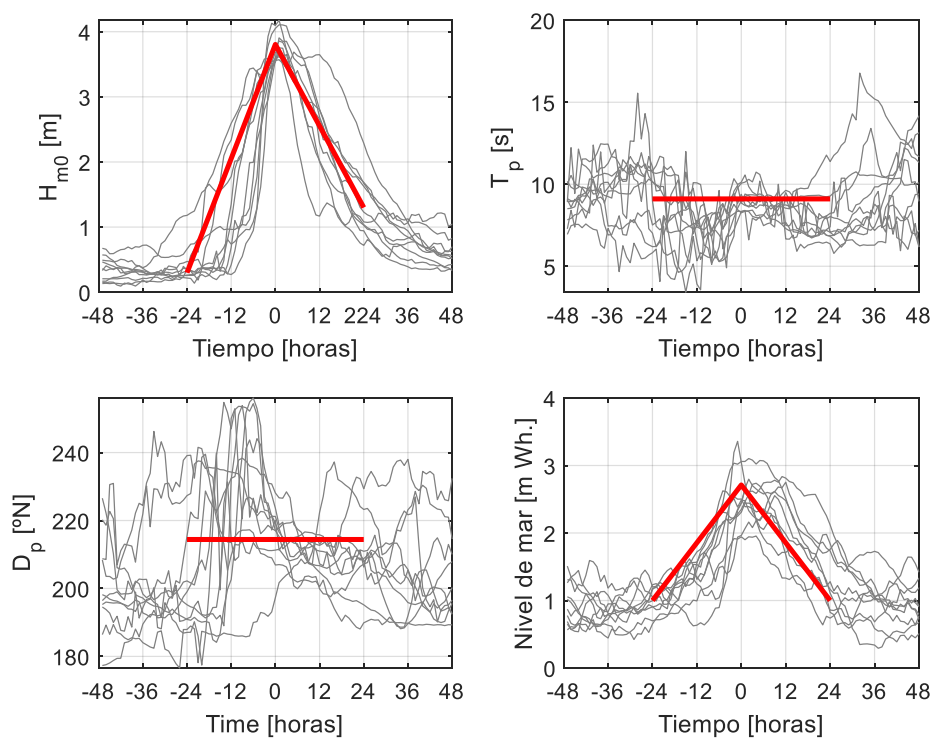


Figura 20 – Superposición de la evolución temporal de las variables H_{m0} , T_m , D_m y nivel de mar, para las diez tormentas de mayor H_{m0} registradas en el nodo PIR19 (en gris), junto con la forma de la tormenta idealizada utilizada en la simulaciones con X-Beach (en rojo).

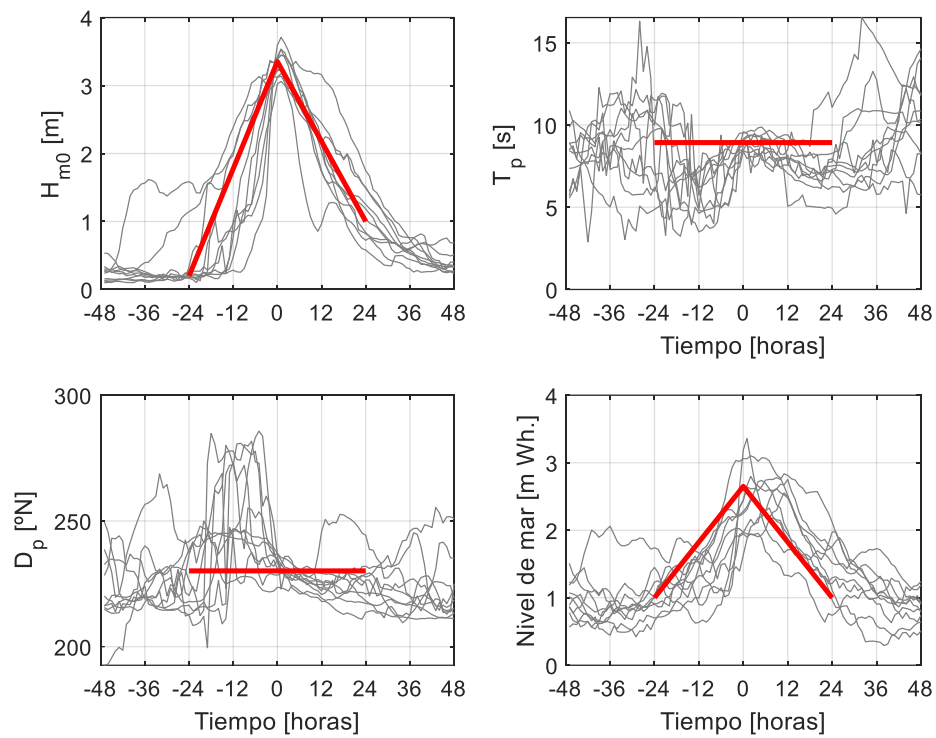


Figura 21 - Superposición de la evolución temporal de las variables H_{m0} , T_m , D_m y nivel de mar, para las diez tormentas de mayor H_{m0} registradas en el nodo PIR32 (en gris), junto con la forma de la tormenta idealizada utilizada en la simulaciones con X-Beach (en rojo).

4.1.3 Resultados

La Figura 22 y Figura 23 presenta la respuesta de los tres perfiles de playa analizados para la tormenta idealizada de 10 y 100 años de período de retorno, respectivamente. En cada gráfico se incluye el perfil de playa y el nivel de mar total en playa (incluyendo el set-up, calculado por XBeach) al inicio, en el momento del pico y al final de la tormenta. Los máximos niveles de mar se alcanzan en el pico de la tormenta, mientras que las máximas erosiones se alcanzan al final de la tormenta. De estas figuras se desprende que:

- perfil 5: la duna primaria es fuertemente erosionada durante el evento de 10 años de período de retorno, y se pierde casi completamente en el evento de 100 años; tras la tormenta existe un ancho de playa disponible con nivel medio de varias decenas de metros,
- perfil 30: la playa queda totalmente sumergida durante el pico de la tormenta tanto para 10 como para 100 años de período de retorno; en ambos casos la erosión de playa alcanza al muro de la rambla, y el muro de la rambla es impactado por el oleaje, con una profundidad de agua al pie del muro en torno a los 2 m durante el pico de la tormenta; el nivel medio del mar en playa no alcanza el nivel de la rambla, pero no se descarta que exista rebase por efecto del oleaje; al final de la tormenta el ancho de playa disponible es del orden de 10 m o menos;
- perfil 61: la playa queda totalmente sumergida durante el pico de la tormenta tanto para 10 como para 100 años de período de retorno; en ambos casos la erosión de playa alcanza al muro de la rambla, pero con muy poca profundidad de agua al pie del; el nivel medio del mar en playa no alcanza el nivel de la rambla, y aunque no se descarta que exista rebase por efecto del oleaje, el mismo sería significativamente menor al del perfil 30 dado el mayor francobordo y la menor profundidad disponibles al pie del muro; al final de la tormenta se tiene un ancho de playa muy similar al que se tiene previo a la tormenta, aunque con un perfil de playa más tendido y con menor cota de berma.

Por último, a partir de estos resultados es posible estimar la distancia, medida desde la posición de la línea de costa previo a la tormenta, hasta la que se observa erosión de playa ($d_{\text{erosión}}$; ver esquema en Figura 24). La Tabla 2 resume los resultados obtenidos. Se observa que **en el caso de un perfil con duna (perfil 5) la erosión alcanza hasta los 65 m y 80 m, para 10 y 100 años de período de retorno respectivamente, mientras que para un perfil sin duna y más tendido que el anterior (perfil 61) la erosión alcanzaría distancias algo mayores a 110 m.**

Tabla 2 – Distancia hasta la que llega la erosión de la playa ($d_{\text{erosión}}$) para las distintas tormentas en los perfiles analizados, medida desde la posición de la línea de costa al inicio de la tormenta.

Perfil	Tr 10 años	Tr 100 años	Observaciones
Perfil 5	65 m	80 m	Se erosiona la primera duna parcial o completamente
Perfil 30	>35 m	>35 m	Distancia limitada por el muro
Perfil 61	>110 m	>110 m	Distancia limitada por el muro

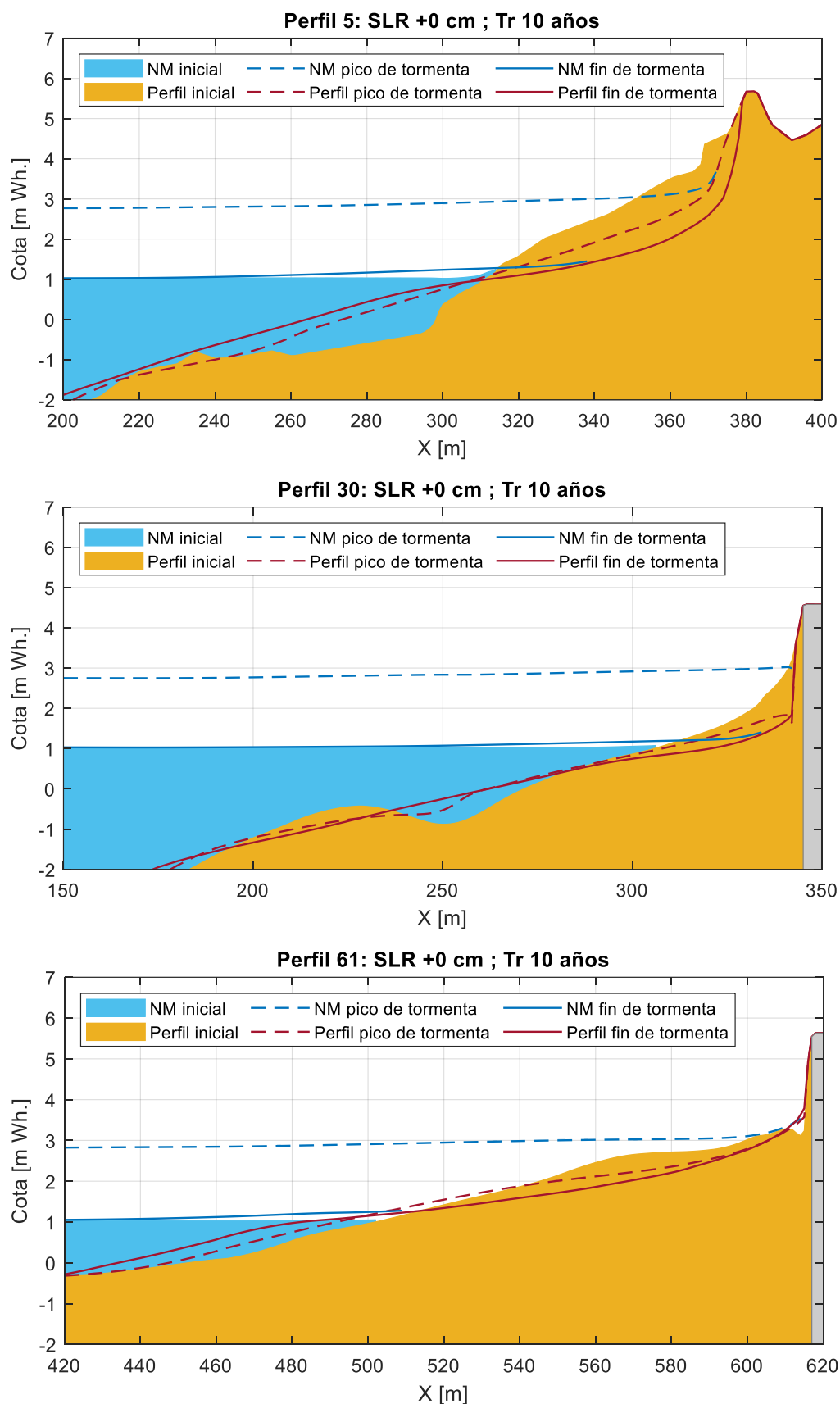


Figura 22 – Respuesta del perfil de playa ante la tormenta (idealizada) de 10 años de período de retorno, para el perfil 5 (arriba), perfil 30 (centro) y perfil 61 (abajo). Se muestra el perfil de playa y el nivel de mar al inicio, en el pico y al final de la tormenta.

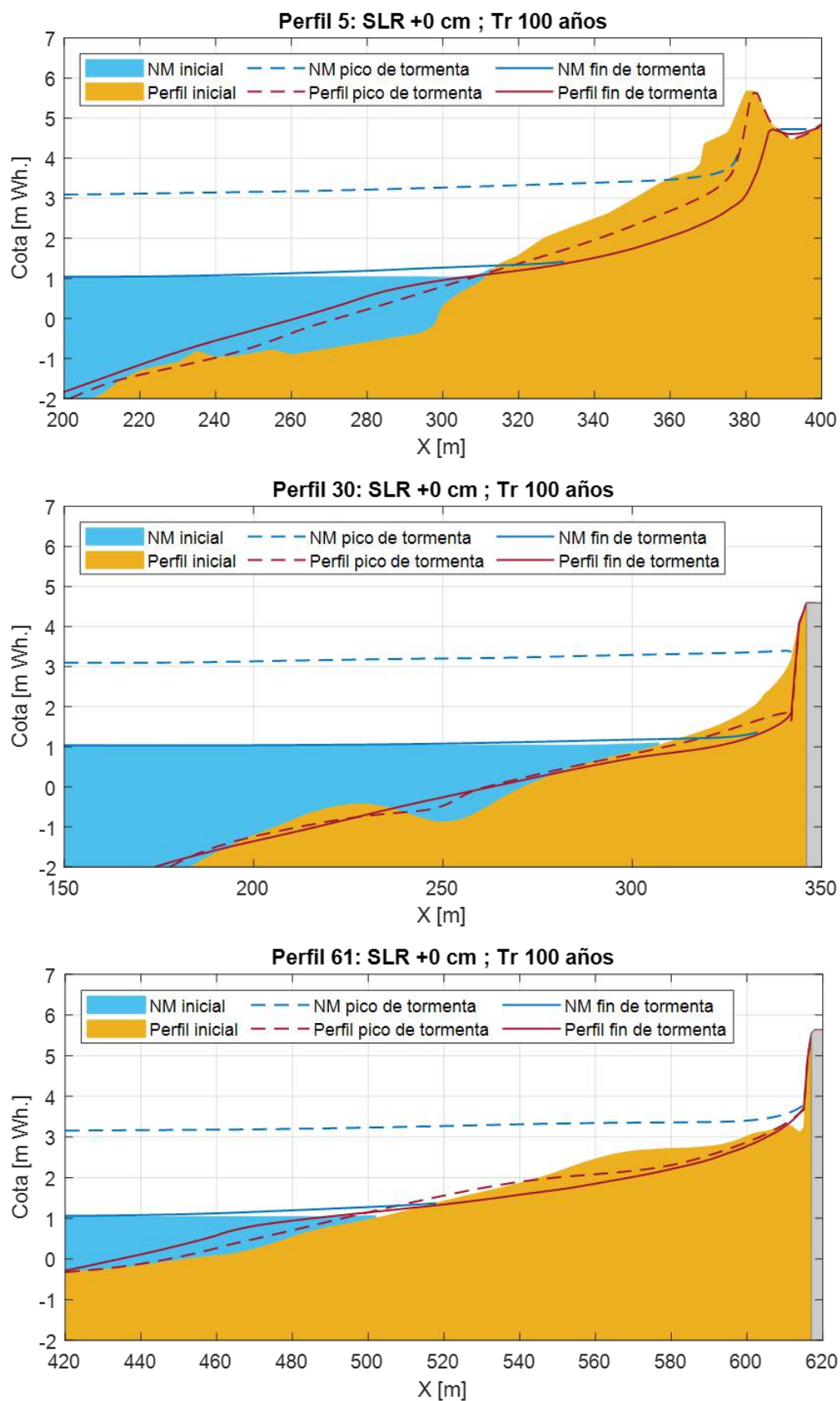


Figura 23 – Respuesta del perfil de playa ante la tormenta (idealizada) de 100 años de período de retorno, para el perfil 5 (arriba), perfil 30 (centro) y perfil 61 (abajo). Se muestra el perfil de playa y el nivel de mar al inicio, en el pico y al final de la tormenta.

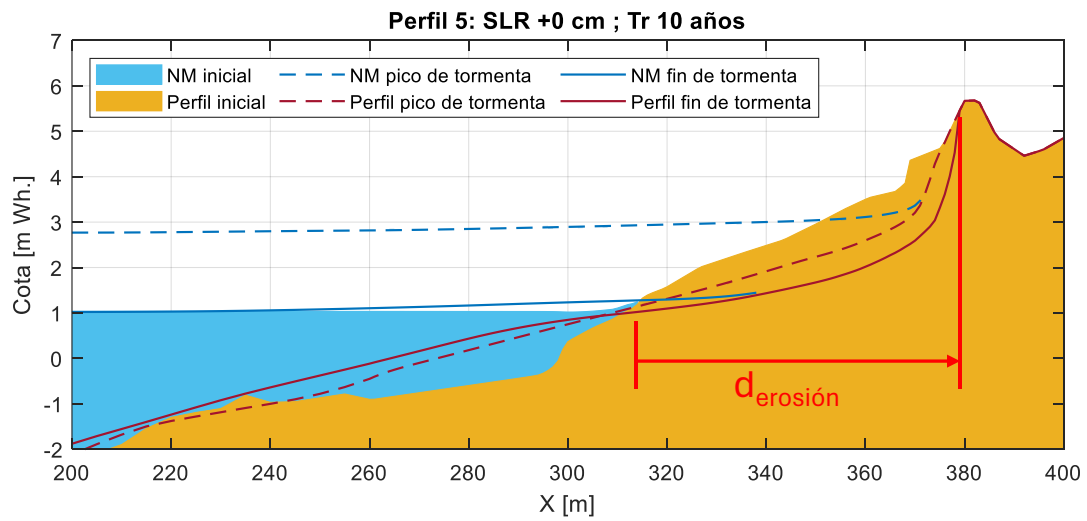


Figura 24 – Esquema del cálculo de la distancia hasta la que se tiene erosión, medida desde la línea de costa previo a la ocurrencia de la tormenta.

4.2 Análisis a mediano plazo

4.2.1 Obras portuarias y litorales presentes en el arco de playa

Para interpretar los resultados del análisis de la línea de costa a mediano plazo que se presenta en los apartados siguientes, es necesario tener presente la fecha de construcción de algunas de las obras portuarias y litorales construidas en la playa de Piriápolis a lo largo del S.XX. Tras la construcción de la rambla en 1920, las principales intervenciones realizadas en el arco de playa de Piriápolis fueron:

- 1944: construcción de 9 espigones en el tramo sur de la playa, entre Rambla de los Ingleses y Av. Gral. Artigas,
- 1960-1961: extensión de los espigones existentes y construcción de un décimo espigón en el mismo tramo,
- 1980-1984: construcción de 6 nuevos espigones en el tramo norte de la playa, entre Av. Gral. Artigas y Plaza Armenia (no se tiene la fecha exacta de construcción),
- 1997: ampliación de a obras de abrigo del puerto de Piriápolis.

La Figura 25 resume la siguiente esta información de forma gráfica.



Figura 25 – Fecha de construcción de las principales obras portuarias y litorales realizadas a partir de los años 40 del s.XX.

4.2.2 *Evolución de la línea de costa previo a 1979*

No se dispone de información detallada que permita el análisis de la evolución de la línea de costa en todo el arco de playa con anterioridad a la década de los 80 del siglo pasado. Sin embargo, se cuenta con información parcial, proveniente de MTOP (1979)¹, la cual da cuenta del comportamiento observado en el tramo sur de la playa con posterioridad a la construcción y posterior extensión del campo de espigones construido en 1944. La Figura 26 reproduce la Lámina 8.43 de MTOP (1979), en la que se presenta la evolución de la isóbata -0.3 m entre 1944 y 1978. Como se describe en MTOP (1979), los espigones construidos en 1944 lograron capturar arena y avanzar la línea de costa; tras este éxito inicial se decidió extender los espigones, lo que nuevamente generó un avance de la línea de costa en el tramo.

La imagen de la Figura 26 fue georreferenciada, y a partir de ella se calculó la ganancia de playa en los periodos 1944-1961 y 1961-1978, lo cual se resume en la Tabla 3. Según estos resultados, el sistema habría estado ganando entre 12.000 m³ y 14.000 m³ de arena por año a lo largo del período 1944-1978.

Tabla 3 – Área de playa ganada entre 1944 y 1978, calculada a partir de la Lámina 8.43 de MTOP (1979), y volumen de arena ganado en el tramo estimado a partir de aquella.

Período	Área de playa ganada	Volumen estimado de arena ganado
1944-1961	4,2 has	210.000 m ³
1961-1978	4,8 has	240.000 m ³

¹ Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – UNESCO. Conservación y Mejora de Playas – URU. 73.007. Uruguay, 1979.

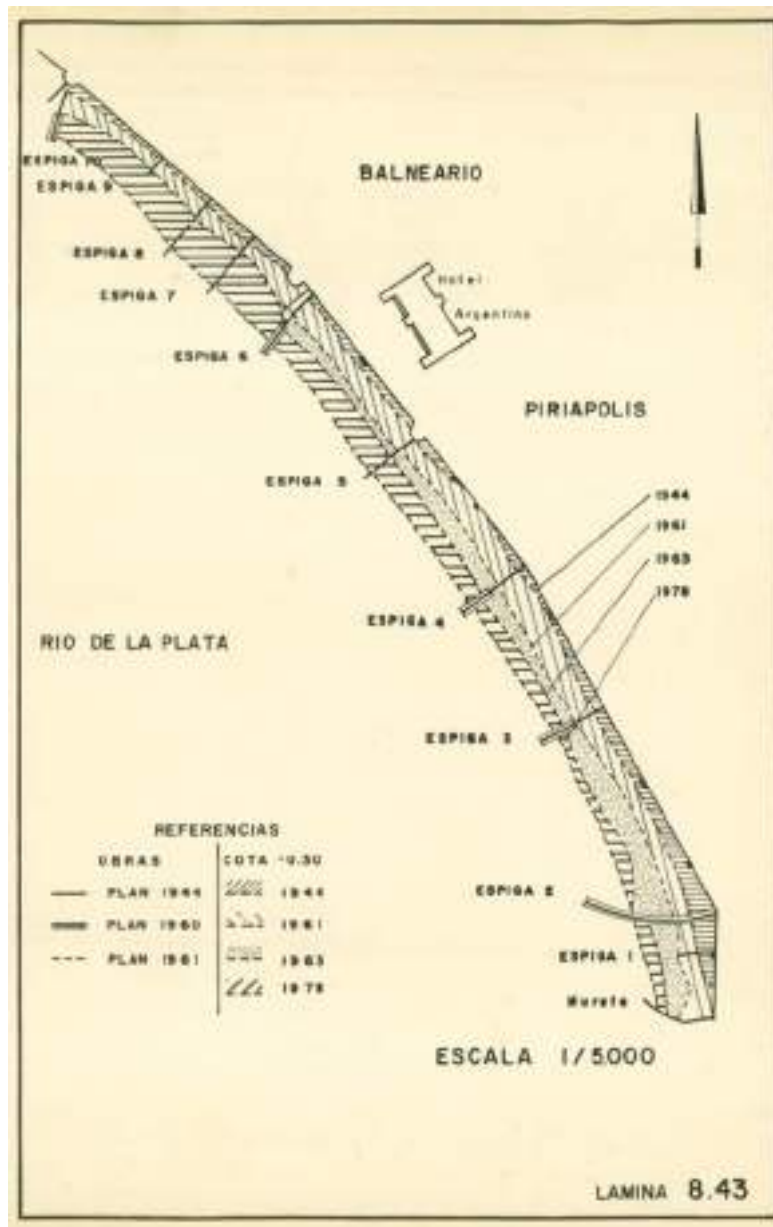


Figura 26 – Evolución de la isóbata -0.3 m en el tramo sur de la playa de Piriápolis, entre 1944 y 1978 (Lamina 8.43 de MTOP, 1979).

4.2.3 Evolución de la línea de costa en el período 1985-2022

Para el análisis de la evolución histórica de la línea de costa en el período posterior a 1985 se utiliza información satelital obtenida mediante la herramienta CoastSat². Definida una región de interés, esta herramienta descarga las imágenes satelitales de las colecciones Sentinel 2 y Landsat 5, 7, 8 y 9 desde Google Earth Engine, aumenta su resolución mediante un algoritmo de *pansharpenning*, y finalmente identifica la posición de la línea de costa en cada una de las imágenes. Una vez obtenidas las líneas de costa, se definen perfiles de playa y, para cada perfil, se determina la progresiva a la que se encuentra la línea de costa para cada imagen satelital. En este caso, se definieron perfiles cada 50 m, totalizando 63 perfiles a lo largo de la zona de estudio (ver Figura 27).

Dado que tanto la georreferenciación de las imágenes satelitales como el algoritmo de identificación de la línea de costa implementado en CoastSat pueden presentar sesgos hacia el mar o hacia tierra para los distintos satélites, se realiza la siguiente corrección de sesgos en los resultados, previo a su análisis:

- Las progresivas de línea de costa provenientes del satélite Landsat 9 se corrigen con las progresivas del satélite Sentinel 2 utilizando la diferencia entre las medianas del año 2022.
- Las progresivas provenientes de los satélites Landsat 7 y Landsat 8 se corrigen con las progresivas del satélite Sentinel 2 utilizando la diferencia entre las medianas del período común 2016-2022.
- Las progresivas provenientes del satélite Landsat 5 se corrigen con las progresivas del satélite Landsat 7 (ya corregidas) utilizando la diferencia entre las medianas del período común 2000-2011.

Una vez calculadas y corregidas las progresivas, se calcula para cada perfil la mediana anual de la progresiva, a partir de las cuales se construye la mediana anual de la posición de la línea de costa³.

La Figura 28 presenta la evolución de las medianas de la línea de costa de la playa de Piriápolis obtenida a partir del análisis descrito previamente. Se observa que al norte de Plaza Armenia y en el entorno del Hotel Argentino la línea de costa se ha mantenido relativamente estable, mientras que en los tramos entre Plaza Armenia y Av. Gral. Artigas (aprox.) y al sur del Hotel Argentino la línea de costa a tendido a avanzar.

En función de lo anterior, se definen cuatro tramos de costa para realizar el análisis cuantitativo de la evolución de la línea de costa. La Figura 29 muestra los cuatro tramos definidos:

- tramo 1: perfiles 1 a 10,
- tramo 2: perfiles 11 a 39,
- tramo 3: perfiles 40 a 48,

² Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>

³ En este análisis se usa la mediana en lugar de la media para reducir la sensibilidad de los resultados a valores de progresiva de la línea de costa particularmente altos o bajos, ya sea que estos sean reales u originados en errores del algoritmo de identificación de la línea de costa implementado en CoastSat.

- tramo 4: perfiles 49 a 62.

Para cada uno de estos tramos, y para el conjunto del arco de playa, se calcula el avance o retroceso medio de la línea de costa mediana anual, respecto a la línea de costa mediana de 1985. Los resultados se presentan en las figuras Figura 30 a Figura 34. De las mismas se desprende que:

- la posición de la línea de costa en el tramo 1 (Figura 30) se ha mantenido mayormente estable a lo largo del tiempo, con un avance de la línea de costa posterior a 1997; en 2022 se observa un fuerte retroceso de la línea de costa respecto a lo observado en años previos;
- la línea de costa en el tramo 2 (Figura 31) ha tendido a avanzar de forma más o menos sistemática desde 1985; se observa un avance particularmente fuerte en los dos años posteriores a 1997; en 2022 se observa un fuerte retroceso respecto a los años previos;
- la línea de costa en el tramo 3 (Figura 32) se ha mantenido bastante estable a lo largo del tiempo, excepto por un marcado retroceso y posterior avance en la década de los años 90; en 2022 se registró un retroceso respecto a los años previos, aunque de menor magnitud que en los tramos anteriores;
- la línea de costa en el tramo 4 (Figura 33) ha tendido a avanzar de forma más o menos sistemática desde 1985; se observa un avance particularmente fuerte en los dos años posteriores a 1997 y en el año 2002; en 2022 se registró un retroceso respecto a los años previos, aunque de menor magnitud que en los tramos anteriores.

Mirando el arco de playa en su conjunto (Figura 34) se observa que, en términos de promedios espaciales, la línea de costa se ha mantenido más o menos estable entre 1985 y 1997, con avances y retrocesos del orden de ± 10 m; entre 1997 y 1999 ocurrió un avance significativo, de algo más de 10 m, con un posterior período de estabilidad entre 2000 y 2010; con posterioridad a 2010 ocurrió un nuevo avance y posterior estabilización; en 2022 se observa un retroceso del orden de 10 m respecto a los años previos. Si se compara el período 1985-1995 con el período 2012-2022 se observa que hay un avance medio de la línea de costa en torno a 20 m, aunque se observa que la variabilidad interanual de ± 10 m ocurre todo a lo largo del período analizado.

Teniendo en cuenta la altura del perfil activo de la playa, el avance medio observado en el período implica una ganancia de arena en la playa de aprox. $10.000 \text{ m}^3/\text{año}$.



Figura 27 – Localización de los perfiles utilizados para el análisis de la evolución de la línea de costa a partir de imágenes satelitales.



Figura 28 – Líneas de costa medianas anuales para el período 1985-2022 (los colores oscuros corresponden al inicio del período y los claros al final).



Figura 29 – Sectores definidos para el análisis de la evolución de la línea de costa en el período 1985-2022.

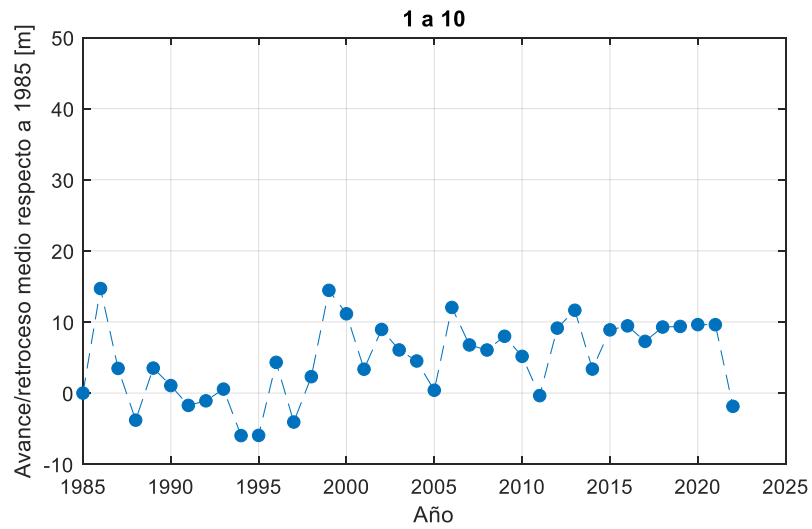


Figura 30 – Avance y retroceso medio de la línea de costa en el tramo 1, medido respecto a la posición de 1985.

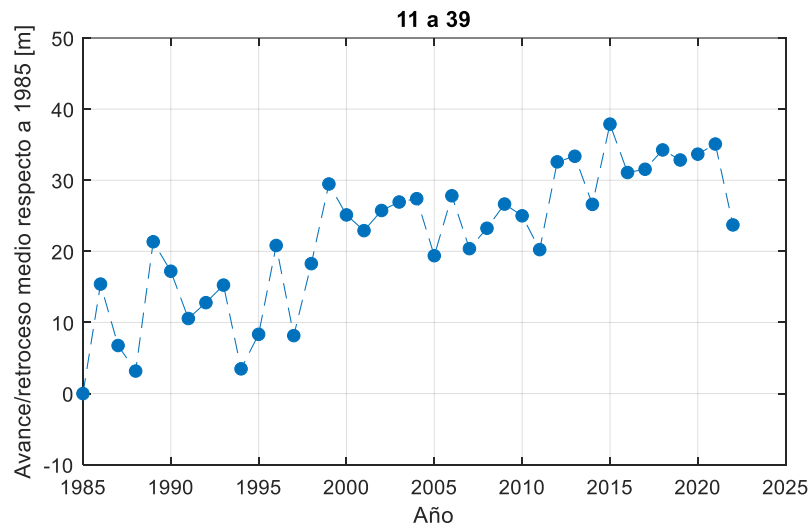


Figura 31 – Avance y retroceso medio de la línea de costa en el tramo 2, medido respecto a la posición de 1985.

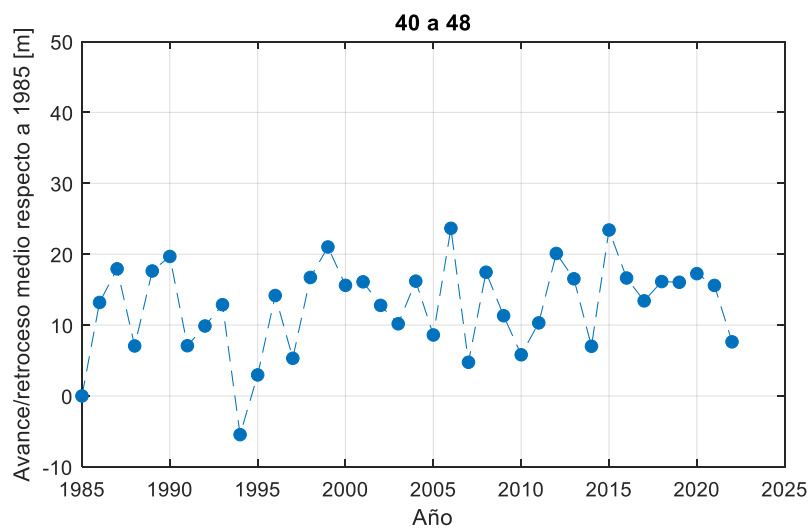


Figura 32 – Avance y retroceso medio de la línea de costa en el tramo 3, medido respecto a la posición de 1985.

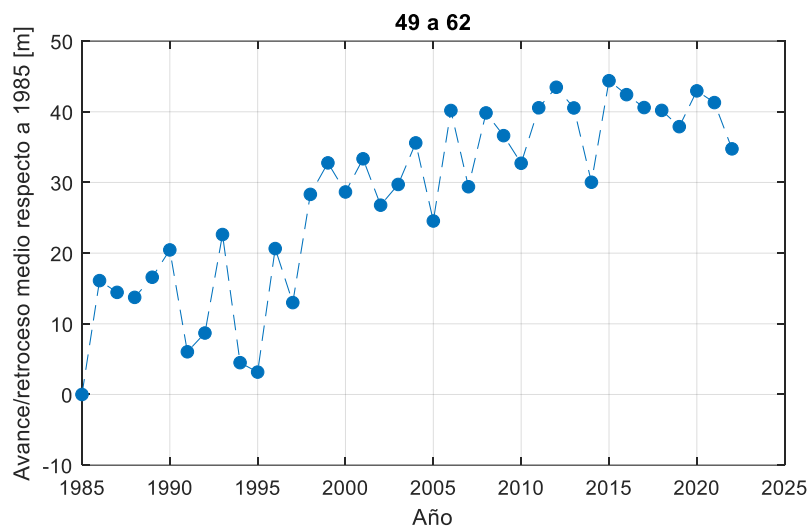


Figura 33 – Avance y retroceso medio de la línea de costa en el tramo 4, medido respecto a la posición de 1985.

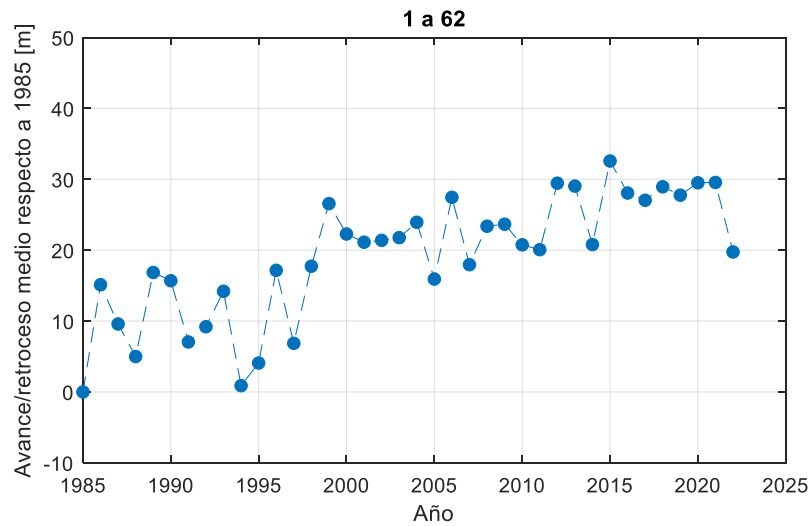


Figura 34 – Avance y retroceso medio de la línea de costa en todo el arco de playa, medido respecto a la posición de 1985.

4.2.4 Estimación de profundidad de cierre y transporte litoral

Profundidad de cierre:

La profundidad de cierre es un indicador de hasta dónde se extiende el perfil activo de playa, en el cual la arena es movilizadora de forma sistemática por la acción del oleaje en una escala de tiempo anual-decadal.

Esta se calcula para cada perfil utilizando la formulación de Nicholls et al (1996)⁴, la cual establece que la profundidad de cierre es:

$$h_c = 2,28H_e - 68,5 \left[\frac{H_e^2}{gT_e^2} \right];$$

en donde H_e es la altura de ola significativa excedida en promedio 12 hrs al año y T_e es el período asociado; para el cálculo de la profundidad de cierre se utiliza en cada perfil la serie de oleaje del nodo costero más próximo. Para ubicar en planta la curva correspondiente a la profundidad de cierre se utiliza la batimetría local suministrada por la Intendencia de Maldonado.

La profundidad de cierre obtenida varía entre la cota -3.6 m Wh. en el tramo norte de la playa y la cota -2.6 m Wh. en el tramo sur. La Figura 35 presenta la localización en planta de la profundidad de cierre, junto con la ubicación y longitud de los espigones construidos en la playa.

Se observa que la profundidad de cierre se ubica a una distancia de entre 150 m y 250 m de la línea de costa, mientras que los espigones no sobresalen más de 50 m de la misma, por lo que en principio se considera que los espigones son cortos en términos hidro-morfodinámicos (i.e. no interrumpen completamente la corriente y el transporte litoral).

Transporte litoral:

En este tramo de costa el transporte de sedimentos en playa está controlado mayoritariamente por efecto del oleaje, siendo los transportes de origen eólico de segundo orden en la morfodinámica de las playas (ver e.g. Solari et al. 2018⁵). Se procede por tanto a estimar únicamente el transporte potencial litoral de arena generado por el oleaje.

Para el cálculo del transporte litoral se utiliza la fórmula del CERC:

$$Q_{cerc} = k_{cerc} c_g H_b^2 \sin 2\alpha_{bs}$$

usando el coeficiente de calibración k_{cerc} propuesto por Mil-Homens et al. (2013)⁶:

⁴ Nicholls, R.J., Birkemeier, W.A., Hallermeier, R.J., 1996. Application of the Depth of Closure Concept, in: Coastal Engineering Proceedings. American Society of Civil Engineers, New York, NY, pp. 3874–3887. <https://doi.org/10.1061/9780784402429.299>

⁵ Solari, S., Alonso, R., Teixeira, L., 2018. Analysis of Coastal Vulnerability along the Uruguayan coasts. J. Coast. Res. 85, 1536–1540. <https://doi.org/10.2112/SI85-308.1>

⁶ Mil-Homens, J., Ranasinghe, R., van Thiel de Vries, J.S.M., Stive, M.J.F., 2013. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. Coast. Eng. 75, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.01.004>

$$k_{cerc} = \left[\left(2232.7 \left(\frac{H_b}{L_o} \right)^{1.45} + 4.505 \right) \left(16 \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) (1 - p) \right) \right]^{-1}$$

en donde α_{bs} es el ángulo en la rompiente relativo a la costa (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), H_b es la altura de ola en la rompiente, c_g es la celeridad de grupo en la rompiente, L_o es la longitud de onda en aguas profundas, ρ_s y ρ_w son la densidad de la arena y del agua, respectivamente, y p es la porosidad de la arena. Para el cálculo de las características del oleaje en la rompiente en cada perfil se propaga el oleaje desde el nodo costero más próximo (ver Figura 9) hasta la rompiente mediante ley de Snell, considerando como criterio de rotura la relación $H_b/h = 0,6$.

Según la convención de ángulos utilizada, el sentido del transporte litoral positivo (negativo) corresponde a transporte hacia la derecha (izquierda) para un observador que esté parado en la playa mirando hacia el mar.

La Figura 37 muestra la dirección media de la costa en el extremo norte de la playa, usada para el cálculo del transporte litoral, junto con la dirección media de la potencia del oleaje que llega a la zona. Se observa que ambas direcciones son muy similares, lo que es un indicador de que el transporte litoral neto en la zona es próximo a cero.

La Figura 38 muestra el transporte litoral potencial bruto (positivo y negativo) y neto anual en el extremo norte de la playa. Se observa que el transporte litoral neto anual es aproximadamente cero, coherente con lo comentado previamente respecto a la resultante de la energía, pero que el transporte litoral bruto es aprox. 200.000 m³/año (100.000 m³/año en cada sentido), lo que indica que la zona es muy dinámica.

Cabe señalar que:

- estos son transporte potenciales, i.e. la ocurrencia de estos transportes estará condicionada a la disponibilidad de sedimentos,
- los transportes potenciales se estiman utilizando formulaciones que asumen costa recta e infinita, algo que no se verifica en la playa de Piriápolis en general, y en este tramo en particular, el cual está limitado por una punta rocosa poco prominente en el extremo oeste y por una desembocadura de un arroyo y un espigón en el extremo este, por lo que los resultados deben tomarse como indicativos, a sabiendas de que el valor real puede desviarse de los mismo.



Figura 35 – Localización en planta del lugar común de las profundidades de cierre obtenidas para los distintos perfiles, junto con la ubicación de los espigones.

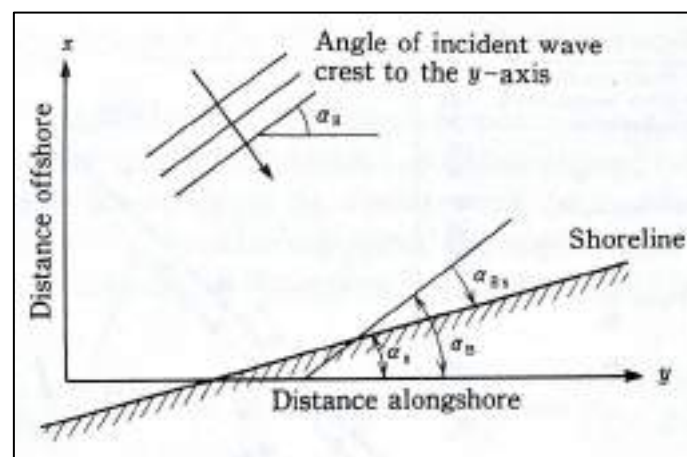


Figura 36 – Convención de ángulos (tomado de figura 3.2 de Horikawa 1988 Part IV⁷).

⁷ Horikawa, Kiyoshi, ed. 1988. Nearshore Dynamics and Coastal Processes. Theory, Measurement, and Predictive Models. University of Tokyo Press.

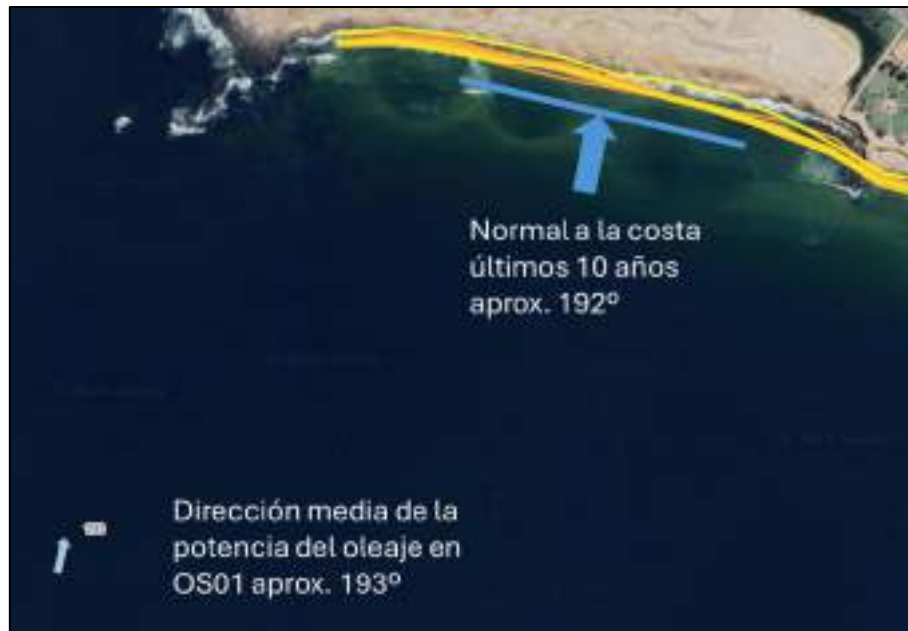


Figura 37 – Dirección normal a la costa en el tramo norte de la playa de Piriápolis, junto con la dirección media de la potencia del oleaje en el punto OS01.



Figura 38 – Transporte litoral bruto (positivo y negativo) y neto, en el tramo norte de la playa de Piriápolis.

4.2.5 *Balance de sedimentos del arco de playa*

El análisis de las líneas de costa, tanto del período pre-1979 como del período 1985-2022, indica que el arco de playa de Piriápolis tiene un superávit de arena de aprox. 10.000 m³/año.

La orientación de las playas en forma de “medio corazón” ubicadas en el tramo de costa Punta del Este - Montevideo indica que la dirección general del transporte litoral en esta zona es hacia el oeste. Teniendo esto en cuenta, el superávit de arena observado en Piriápolis podría originarse en un *bypass* de arena a través de las puntas rocosas de Punta Colorada y Punta Fría y del puerto de Piriápolis (ver Figura 39). Este proceso de *bypass* de arena se ha observado y analizado con anterioridad en puntas rocosas de dimensiones similares a las de este caso de estudio (Klein et al. 2020⁸; ver Figura 40). La presencia de arena en el fondo del lecho, de granulometría similar a la de la playa, reportada en los estudios suministrados por la Intendencia de Maldonado (ver Sección 6.2.3) sugieren que estos mecanismos de *bypass* podrían estar activos en la zona; sin embargo, su verificación para este caso en particular requeriría estudios con plazos y recursos mayores a los disponibles en este asesoramiento.



Figura 39 – Potencial bypass de arena desde el arco Portezuelo-Punta Negra hacia la playa de Piriápolis, a través de Punta Colorada, Punta Fría y el puerto de Piriápolis.

⁸ Klein, A.H.F., Vieira da Silva, G., Tabora, R., da Silva, A.P., Short, A.D. 2020. Headland bypassing and overpassing: Form, processes and applications. Chap. 23 in D.W.T. Jackson & A.D. Short (Eds.) Sandy Beach Morphodynamics, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102927-5.00023-0>



Classification	Main driver process	Conceptual model	Examples
Headland cross-embayment bypassing (HBE)			
	Wave shoaling-induced cross-embayed sand bypassing	 <p>Adapted from Smith (2001).</p>	 <p>Adapted from Goodwin et al. (2013).</p>
Headland bypassing: Waves + tides/wind HBEt/w/s HBEt/w/s HBEt/w/s	HBS HBN HBE assisted by tidal (t), wind (w) driven and/or shelf (s) currents	Examples: Vieira da Silva (2016a, 2018) 'Y' and 'X' (Vieira da Silva, 2016a) 's' Byron Bay (Goodwin et al., 2016; see HBE 'offshore loss')	See fig. 23.7 in Box 23.3.

Figura 40 – Ejemplo de mecanismo de *bypass* de salientes rocosos (tomado de Klein et al. 2020).

4.3 *Análisis a largo plazo*

Se utiliza la parábola de equilibrio en planta para analizar la estabilidad a largo plazo de la playa de Piriápolis, mediante el uso de la herramienta MepBay (Klein et al. 2003⁹). Para la aplicación de la parábola de equilibrio se deben definir tanto el punto de difracción del oleaje (punto duro aguas arriba, en términos de corriente litoral) y la orientación de la costa en el límite aguas abajo corriente litoral de la playa o, en su defecto, la dirección del flujo de energía del oleaje en el punto de difracción.

Para el caso de Piriápolis se tienen dos puntos de difracción del oleaje o puntos duros: Punta Fría hace de punto duro para todo el arco de playa, y el dique exterior del puerto hace de punto duro para el tramo este de la playa. En este caso la parábola se aplica usando de referencia la dirección media de la energía del oleaje en los puntos duros. Para el punto duro de Punta Fría, la dirección media se asume similar a la que llega a todo el tramo de costa y se calcula a partir de los nodos exteriores de ERA5; para el punto duro de difracción generado por el dique exterior del puerto se usa la dirección media de la energía del oleaje estimada a partir de los datos del nodo OS03.

La Figura 41 presenta el resultado obtenido de aplicar la parábola de equilibrio en las siguientes condiciones:

- situación actual, considerando como puntos de apoyo aguas debajo de la playa tanto la saliente rocosa de Punta de los Burros como los extremos de los espigones, y considerando también la difracción generada por el puerto (líneas verdes en la Figura 41; ver detalle en Figura 42);
- situación hipotética, sin espigones (el único punto de apoyo aguas debajo de la playa es Punta de los Burros) y sin el puerto (línea roja en Figura 41).

De la Figura 41 se desprende que la posición en planta de la línea de costa actual coincide razonablemente con la posición de equilibrio estático a largo plazo que se obtiene considerando el efecto de las obras realizadas en la playa, pero se aparta de forma significativa de la posición de equilibrio estático a largo plazo. Esto último es coherente con el proceso de erosión que se observó con posterioridad a la construcción de la rambla y que llevó a la construcción de los campos de espigones para lograr el avance y estabilización de la línea de costa.

Una pregunta que surge a partir de los resultados previos es cuál era la situación de la playa al momento de construcción de la rambla. Cuando se construyó la rambla la línea de costa se encontraba por delante de la línea de equilibrio estático a largo plazo; de acuerdo con lo discutido en Hsu et al. (2021)¹⁰, esta situación se asocia a condiciones de equilibrio dinámico o retroceso de la línea de costa, según exista o no aporte de sedimento al sistema (la dinámica de transporte de sedimentos en el sistema se analiza en el apartado siguiente). Teniendo en cuenta que no se cuenta con evidencia que sugiera que la playa de Piriápolis estuviera en proceso erosivo cuando se construyó la rambla y se urbanizó el balneario, se tiende a pensar que debió haber existido un aporte de sedimentos al sistema, mayor al detectado actualmente, que

⁹ Klein, A. H. da F., Vargas, A., Raabe, A. L. A., & Hsu, J. R. C. (2003). Visual assessment of bayed beach stability with computer software. *Computers & Geosciences*, 29(10), 1249–1257. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.08.002>

¹⁰ Hsu, J.R.C., Lee, J.L., Klein, A.H.F., González, M., Medina, R. 2021. Headland-Bay Beaches. Static Equilibrium Concept for Shoreline Management. *Advances Series on Ocean Engineering*. Volume 53. World Scientific Publishing. <https://doi.org/10.1142/12026>

permitiera mantener la posición de la línea de costa en un equilibrio dinámico, por delante de su posición de equilibrio estático. Las dos potenciales fuentes de sedimentos que se identifican en este sentido son:

- aportes por transporte litoral (*bypass* a través de las puntas rocosas), el cual a comienzos del s.XX podría haber sido mayor al actual dada la mayor disponibilidad de arena libre todo a lo largo de la costa,
- aportes continentales, fundamentalmente originados en el extenso campo de médanos que existía por detrás de la playa (ver Figura 43), el cual fue extensamente forestado y urbanizado a lo largo del tiempo (ver Figura 44).

Otra pregunta que surge de este análisis es cuál ha sido el efecto de la ampliación del puerto de 1997 en la posición de equilibrio estático a largo plazo de la línea de costa. La Figura 45 compara las parábolas de equilibrio obtenidas para el tramo sur considerando el puerto actual y el existente previo a la ampliación de 1997. Se observa que previo a la ampliación del puerto la línea de costa de equilibrio se encontraba por detrás de la rambla, lo que explica la oportuna construcción y ampliación de los espigones de la zona para mantener la línea de costa por delante de su posición de equilibrio; por otro lado, la ampliación del puerto generó un avance importante de la posición de equilibrio de la línea de costa, propiciando el avance de la línea de costa descrito en el apartado anterior. Al día de hoy, la posición de la línea de costa en este tramo coincide razonablemente bien con la parábola de equilibrio estático a largo plazo.



Figura 41 – Forma de equilibrio estático en planta a largo plazo para el arco de playa de Piriápolis, teniendo en cuenta la situación actual (líneas verdes) y la situación hipotética sin espigones y sin el puerto (línea roja).



Figura 42 – Detalle de las parábolas de equilibrio construidas para el tramo norte de la playa, considerando la existencia de los espigones (situación actual).



Figura 43 – Carta geológica de la zona de estudio (tomado de la Lámina 5.7 de MTOP 1979).

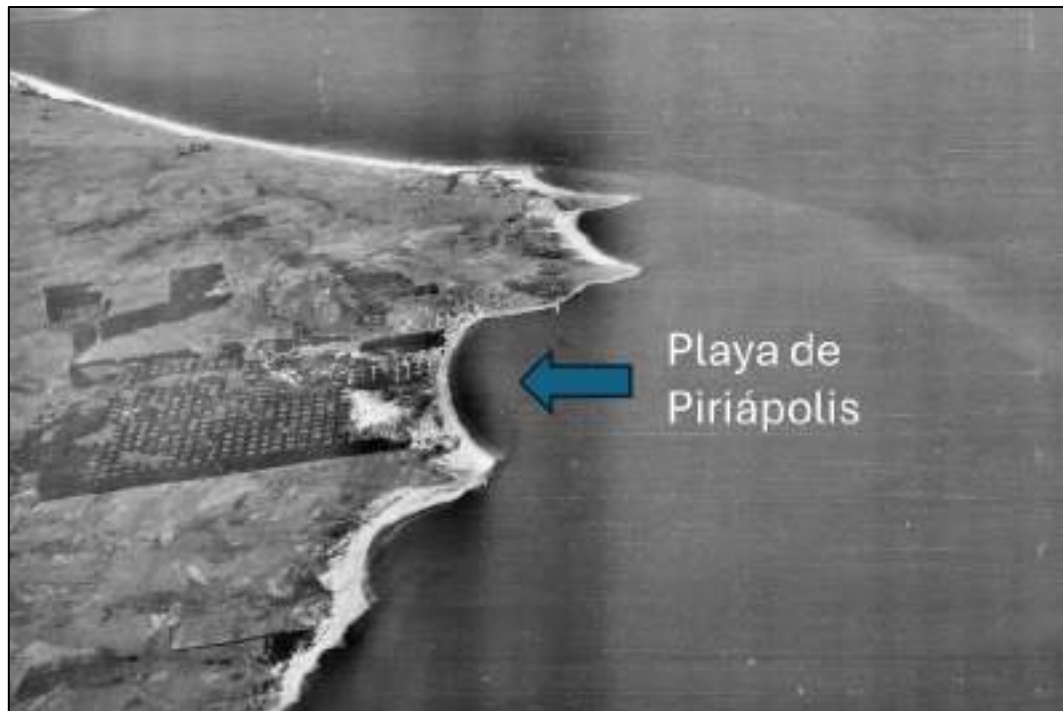


Figura 44 – Foto aérea de 1940.



Figura 45 – Parábolas de equilibrio del tramo sur, construidas considerando el puerto actual (línea verde) y el puerto previo a la ampliación de 1997 (línea roja). Se considera la playa apoyada en el espigón de calle Armenia.

4.4 Resumen de situación actual (línea base)

De los apartados anteriores se desprenden las siguientes conclusiones:

Del análisis a corto plazo se desprende que, dadas las condiciones de clima marítimo de la playa de Piriápolis, se requieren al menos 80 m de playa “natural” o “sana” (sistema de playa y duna similar al que se tiene en el tramo norte de la playa) para evitar que un evento de 100 años de período de retorno alcance al muro de la rambla. A su vez, se observa que un perfil de playa ancho pero sin dunas, como el que se tiene en el tramo sur de la playa, no es suficiente para evitar que los eventos de 10 y 100 años de período de retorno alcancen al muro de la rambla.

De los análisis a mediano y largo plazo se desprende que cada vez que se han construido o alargado espigones en la playa de Piriápolis, el efecto de los mismos ha sido acumular arena y avanzar la posición de la línea de costa en la zona intervenida. A partir del análisis de las imágenes satelitales del período 1985-2022 se desprende que, si bien existe variabilidad interanual en la posición de la línea de costa, no hay ningún tramo de la playa que presente tendencias al retroceso de la línea de costa, y en términos promedio la línea de costa en el arco de playa de Piriápolis ha avanzado del orden de 20 m en dicho período. Este avance está asociado fundamentalmente al llenado del campo de espigones construido entre 1980 y 1984, y a la ampliación del puerto de Piriápolis.

A su vez, el análisis a mediano plazo sugiere que el sistema tiene un superávit de arena del orden de los 10.000 m³/año. Teniendo en cuenta que el transporte litoral en el extremo norte de la playa es aproximadamente nulo en términos netos, se considera que debe existir un aporte de arena por mecanismos de *bypass* de las puntas rocosas de Punta Colorada y Punta Fría, aunque esta hipótesis requeriría estudios específicos de cara a su confirmación.

Por último, el análisis a largo plazo indica que la línea de costa actual está por delante de la línea de costa de equilibrio estático que sería esperable observar en caso de no existir los espigones y el puerto de Piriápolis. La presencia de estas obras explica la línea de costa actual, y al tenerlas en cuenta en el análisis se concluye que la línea de costa actual coincide razonablemente bien con una situación de equilibrio estático. Haciendo foco en el tramo sur de la playa, el análisis de equilibrio a largo plazo muestra que la ampliación del puerto realizada en 1997 ha tenido como efecto que la línea de costa de equilibrio estático en este tramo de playa pasara de estar por detrás de la rambla a estar significativamente por delante de esta, propiciando el importante avance de la línea de costa registrado en este tramo con posterioridad a 1997.

Por otro lado, del análisis realizado quedan planteadas algunas interrogantes:

Del análisis a mediano plazo surge que en los años inmediatamente posteriores a la ampliación del puerto hubo un avance importante de la línea de costa en todos los tramos de la playa. Si bien la ampliación del puerto explica claramente el avance observado en el tramo sur, no surge con claridad cómo esta ampliación pudo haber afectado al resto de los tramos de playa.

El análisis a largo plazo sugiere que, en una condición “*sin obras*” (sin espigones y sin puerto) la playa debería estar o en proceso erosivo o en estado de equilibrio dinámico. En principio no hay evidencias que sugiera la existencia de un proceso erosivo en la zona previo a la forestación y urbanización del lugar, por lo que se plantea la hipótesis de que la forestación y urbanización de la zona pudo haber afectado el balance de sedimentos del arco de playa, el cual debió haber tenido un superávit mayor al actual para poder mantener la línea de costa en equilibrio dinámico, significativamente por delante de la posición de equilibrio estático. Si bien la información geológica de la zona indica que en la zona habría existido abundante arena disponible, sería necesario identificar y cuantificar los procesos involucrados en la movilización de la misma hacia y desde la playa para poder confirmar esta hipótesis.

5 Proyección de evolución de la línea de costa y cambio en las amenazas de erosión e inundación costera

De los estudios realizados por IH-Cantabria para la costa de Uruguay¹¹, así como de Jackson et al. (2022)¹² se desprende que el principal cambio en los agentes marítimos asociados al cambio climático es el aumento del nivel medio del mar, siendo los cambios en las mareas (meteorológica y astronómica) y en el oleaje de segundo orden respecto a aquel. A su vez, de los estudios presentados en las secciones anteriores surge que el tramo de costa analizado no tiene déficit de sedimentos. Por lo tanto, para la proyección de la evolución de la línea de costa a mediano y largo plazo se considerará únicamente el retroceso de la línea de costa por redistribución de los sedimentos en el perfil de playa, producto del aumento del nivel medio del mar.

A fin de ser coherente con otros estudios realizados de adaptación de playas al cambio climático, realizados recientemente para el Ministerio de Ambiente, se trabaja con las proyecciones de aumento del nivel medio del mar correspondientes al escenario RCP 8.5. La Figura 46 superpone la evolución reciente del nivel medio del mar medido en Piriápolis (datos de DNH/DINAGUA) con la proyección de aumento del nivel medio del mar incluida en el informe de IH-Cantabria. Se observa que el nivel medio del mar en Piriápolis ha tenido una tendencia creciente, la cual es coherente con las proyecciones.

Para las proyecciones de la evolución de la línea de costa a futuro se consideran valores de aumento del nivel medio del mar de +20 cm, +40 cm, +60 cm y +80 cm, haciendo especial hincapié en los dos primeros, a los que se asocian los horizontes temporales 2050 y 2075, respectivamente.

Cabe señalar que estas proyecciones son coherentes con las últimas proyecciones regionales incluidas en el IPCC AR6¹³, las cuales se presentan en la Figura 47 para los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. De la figura se desprende que, teniendo en cuenta estos escenarios, sería esperable alcanzar un aumento de +20 cm entre 2045 y 2065, y un aumento de +40 cm entre 2065 y 2100 (este rango se reduce a 2065-2085 si se considera solo el escenario SSP5-8.5).

¹¹ IH-Cantabria. Desarrollo de herramientas tecnológicas para evaluar los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D3.2: proyecciones de cambio climático del oleaje y residuo del nivel del mar en Uruguay. Proyecciones regionales del nivel medio del mar en Uruguay. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-08/Proyecciones%20de%20cambio%20clim%C3%A1tico%20del%20oleaje%20y%20residuo%20del%20nivel%20del%20mar%20en%20Uruguay_0.pdf

¹² Jackson, M., Fossati, M., & Solari, S. (2022). Sea Levels Dynamical Downscaling and Climate Change Projections at the Uruguayan Coast. *Frontiers in Marine Science*, 9(March), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.846396>

¹³ Ver herramienta en línea: <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

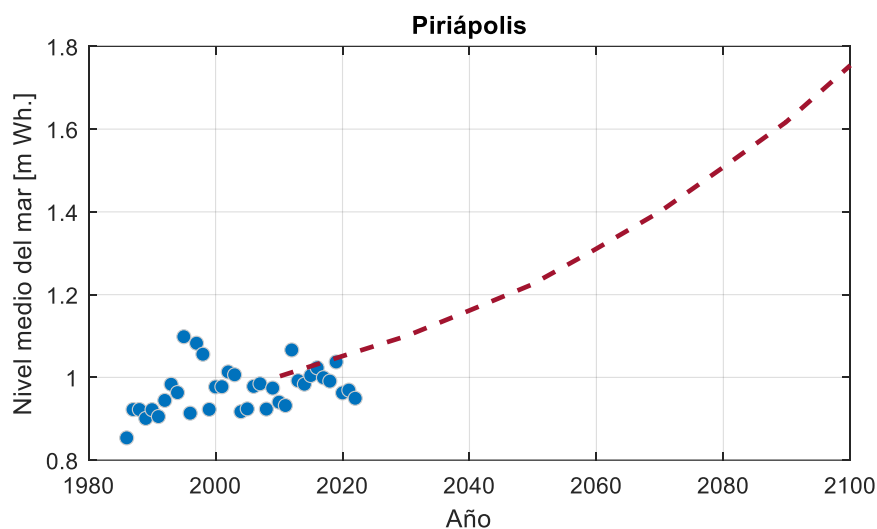


Figura 46 – Superposición de los datos de nivel medio anual medido en Piriápolis por DNH/DINAGUA y proyección del aumento del nivel medio del mar para el escenario RCP8.5 informada por IH-Cantabria para la costa de Uruguay.

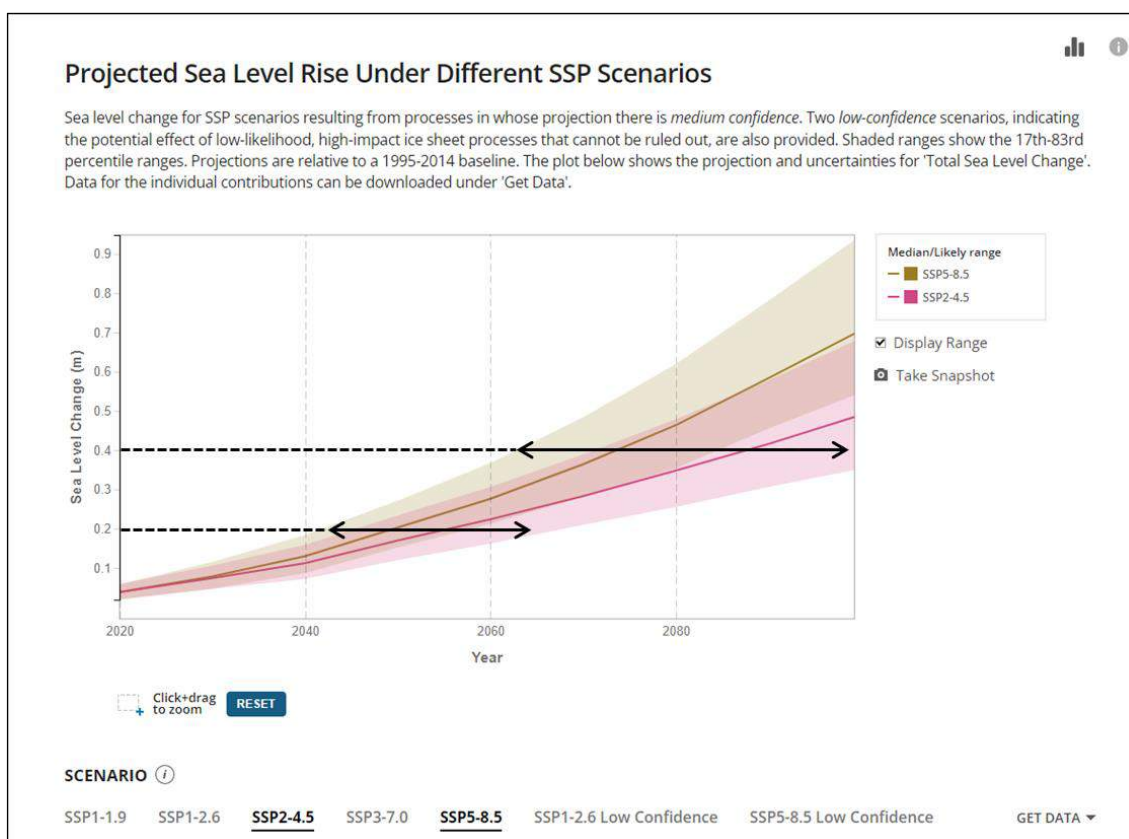


Figura 47 – Captura de pantalla de las proyecciones de aumento del nivel medio del mar para el nodo “Punta del Este”, obtenido del IPCC AR6¹⁴. Se señala el rango de años en los que se prevé se alcancen +20 cm y +40 cm de aumento del NMM.

¹⁴ Ver herramienta en línea: <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

5.1 Retroceso de la línea de costa por aumento del nivel medio del mar

El aumento del nivel medio del mar produce una redistribución de los sedimentos en el perfil de playa, el cual típicamente resulta en un retroceso del perfil sin afectar la forma de este, siempre que exista suficiente disponibilidad de sedimentos (por ejemplo, en el caso de un perfil con duna que sirva de fuente de sedimentos), o en el descenso del perfil cuando se tiene un revestimiento, barranco o muro costero que limite el suministro de sedimentos desde tierra.

Para calcular el retroceso del perfil (o su descenso en caso de perfiles en que el retroceso esté limitado, por ejemplo, por el muro de la rambla) se utiliza el modelo ShoreTrans¹⁵. Éste es un modelo sencillo de traslación del perfil de playa basado en reglas, que utiliza el perfil de playa medido (no una parametrización o un perfil simplificado) para estimar el cambio en la línea de costa resultante del aumento del nivel medio del mar de forma realista. Los perfiles de playa se construyeron combinando la información topo-batimétrica proporcionada por la Intendencia de Maldonado con la información del modelo digital del terreno disponible en la Infraestructura de Datos Espaciales (ide.uy). En todos los perfiles se consideró que la erosión puede llegar hasta el muro de la rambla, pero no más allá. Los perfiles utilizados para el análisis son los ya definidos para el análisis de las imágenes satelitales, los cuales se presentaron en la sección 4.2.3 (ver Figura 27). A modo de ejemplo, la Figura 48 presenta un ejemplo de aplicación del modelo ShoreTrans al perfil 2.

La Figura 49 presenta la evolución del perfil de playa para aumentos del NMM de entre +20 cm y +80 cm para los perfiles 5, 30 y 61 (los mismos perfiles que fueron analizados en la sección 4.1). En estas figuras se puede apreciar el retroceso de la línea de costa producto del aumento del NMM; en particular, para el perfil 30, en el cual el ancho de playa disponible es muy limitado, se aprecia el descenso sistemático del perfil de playa frente al muro, y la pérdida de prácticamente la totalidad de la playa emergida para aumentos del NMM mayores a +40 cm.

La Figura 50 presenta el retroceso de la línea de costa esperable para cada perfil de playa, para aumentos de +20 cm, +40 cm y +60 cm. Se observa que cada 20 cm de aumento del NMM se tienen aprox. 6 m de retroceso en los perfiles 1 a 20, aprox. 10 m de retroceso en los perfiles 20 a 40 y aprox. 13 m de retroceso en los perfiles 50 a 60; en los perfiles 40 a 50 el retroceso de la línea de costa para aumentos mayores a 20 cm empieza a estar afectado por el muro, con pérdida total de la playa a efectos prácticos. Estos valores de retroceso se representan en plana en la Figura 51 (Figura 52) para la mitad Norte (Sur) de la playa, trasladando la línea de costa actual (mediana de los últimos años obtenida del análisis de imágenes satelitales) según el retroceso estimado para cada perfil.

¹⁵ McCarroll, R. J., Masselink, G., Valiente, N. G., Scott, T., Wiggins, M., Kirby, J. A., & Davidson, M. (2021). A rules-based shoreface translation and sediment budgeting tool for estimating coastal change: ShoreTrans. *Marine Geology*, 435, 106466. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106466>

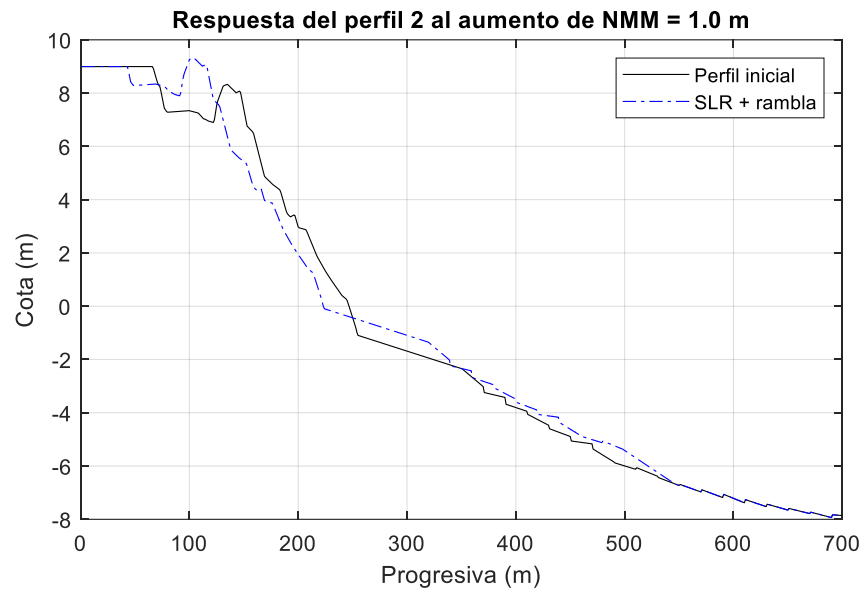


Figura 48 – Ejemplo de la aplicación del modelo ShoreTrans al perfil 2, considerando un aumento del nivel medio del mar de 1 m.

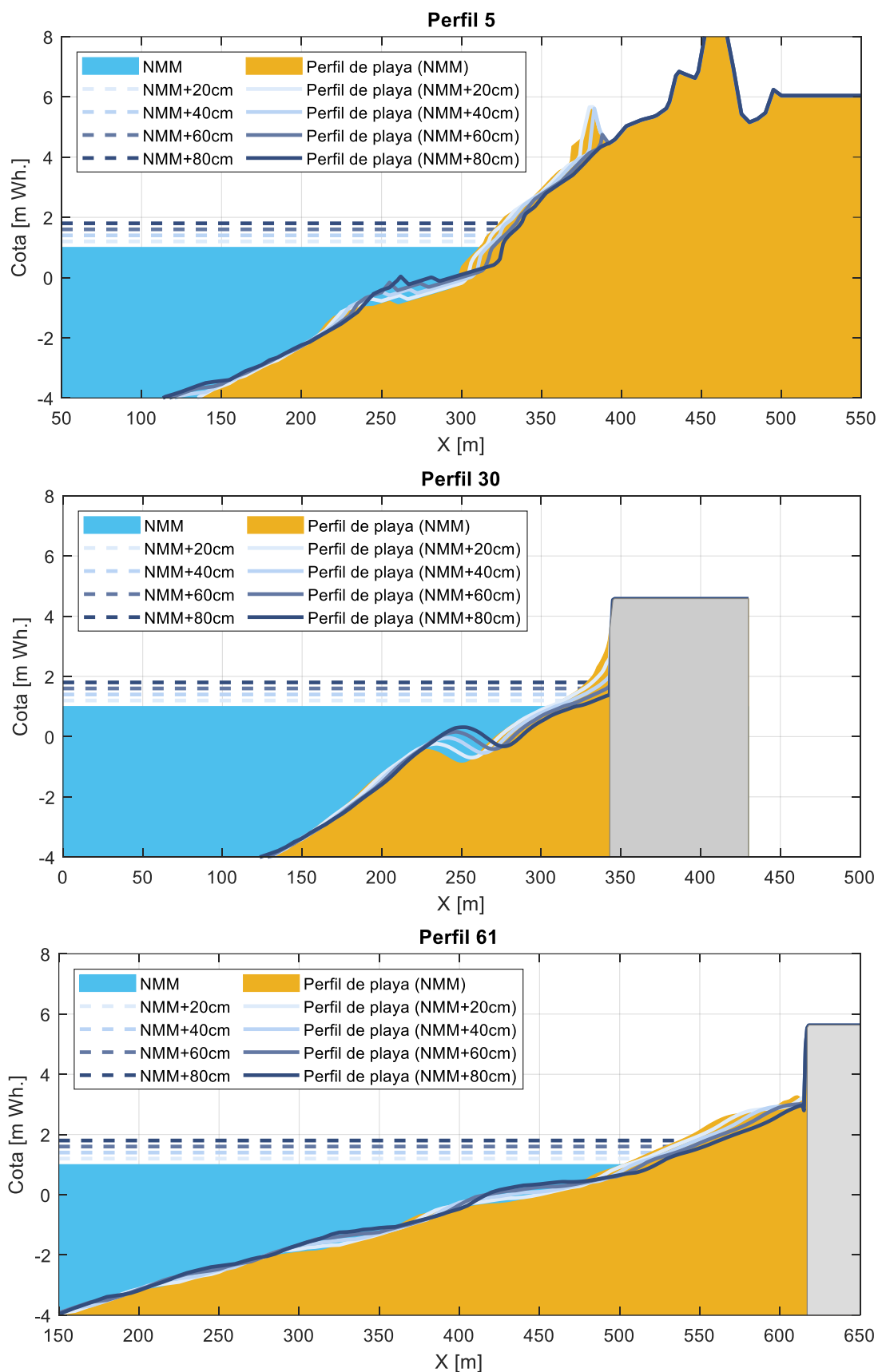


Figura 49 – Evolución del perfil de playa con el aumento del NMM, para los perfiles 5 (arriba), 30 (centro) y 61 (abajo).

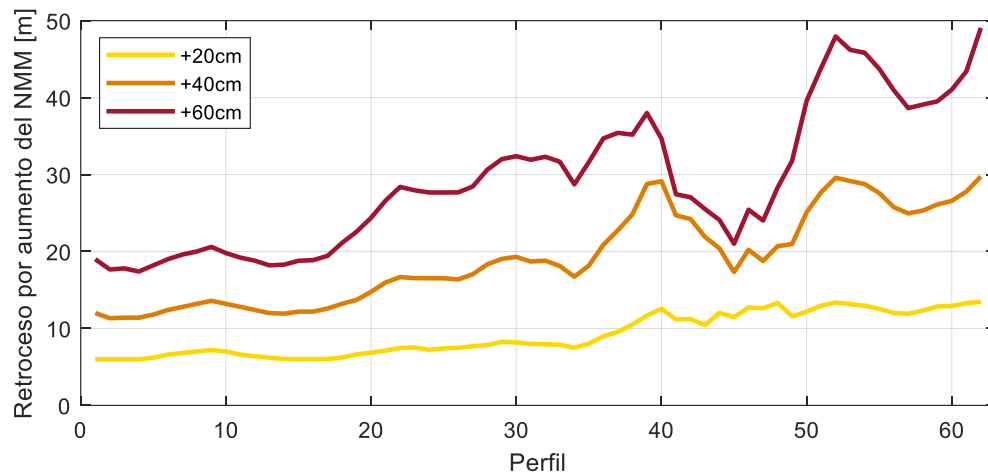


Figura 50 – Retroceso de la línea de costa por aumento del NMM para todos los perfiles analizados.



Figura 51 – Posición media de la línea de costa actual (verde) y calculada con ShoreTrans asumiendo aumento del NMM de +20 cm (amarillo), +40 cm (naranja) y +60 cm (rojo). Mitad Norte de la playa.



Figura 52 – Posición media de la línea de costa actual (verde) y calculada con ShoreTrans asumiendo aumento del NMM de +20 cm (amarillo), +40 cm (naranja) y +60 cm (rojo). Mitad Sur de la playa.

5.2 Análisis a corto plazo en escenarios de cambio climático: cambios en la amenaza de erosión e inundación costera

Con el fin de calcular la distancia máxima hasta la que podría llegar la erosión durante eventos de tormenta, así como la potencial inundación por efecto de la misma, se repitió el análisis a corto plazo presentado en la sección 4.1, pero bajo distintos escenarios de aumento del NMM, teniendo en cuenta el cambio en el perfil de playa que estos implican.

Al igual que en la sección 4.1 se utiliza el modelo X-Beach aplicado a los perfiles de playa 5, 30 y 61, y se simulan eventos de tormenta de 10 y 100 años de período de retorno. Las simulaciones se realizan bajo las siguientes hipótesis:

- En línea con los estudios realizados por IH-Cantabria para la costa de Uruguay¹⁶, se considera que el clima de olas y niveles de mar extremos no cambia; el único cambio en el clima marítimo es el aumento del NMM. Las tormentas simuladas son las mismas que se presentaron en la sección 4.1.
- Los perfiles de playa al inicio de la tormenta son los obtenidos de aplicar el modelo ShoreTrans con el aumento del NMM correspondiente a cada escenario (ver Figura 49).

Con estas simulaciones se analiza cómo el aumento del NMM aumenta la distancia máxima hasta la que puede llegar la erosión de playa (ver ejemplo en Figura 53) y si el nivel de mar total en playa supera o no el nivel de la rambla (ver ejemplo en la Figura 54).

En lo que respecta a las distancias hasta las que se tiene erosión, los resultados se resumen en la Tabla 4 para el escenario de +20 cm de aumento del NMM, y en la Tabla 5 para el escenario de +40 cm de aumento del NMM. Se observa que en los perfiles 30 y 61, en los que ya en la actualidad la erosión de la playa se extiende hasta la rambla durante eventos extremos, esta situación se mantiene, mientras que en el perfil 5, la distancia total hasta la que se tendría erosión aumenta. En este último caso, considerando el escenario de 40 cm de aumento de NMM, la distancia total hasta la que se tiene erosión para una tormenta de 100 años de período de retorno, medida desde la posición de la línea de costa actual, es aprox. 110 m.

En lo que respecta al nivel de mar en playa, en ninguno de los escenarios analizados el nivel de mar medio en playa, incluyendo el set-up, supera el nivel de la rambla. Sin embargo, como se señala en la Figura 54, el francobordo disponible en la rambla se verá reducido, a la vez que aumentará la profundidad al pie de la estructura, por lo que es esperable que aumente el caudal de rebase y los esfuerzos sobre la rambla por la acción del oleaje. Cabe señalar que en la Figura 54 la disminución del francobordo es algo menor que el aumento del NMM porque al aumentar las profundidades a pie de la estructura el set-up del oleaje se ve disminuido en el escenario con aumento del NMM respecto al que se tiene en la actualidad.

¹⁶ IH-Cantabria. Desarrollo de herramientas tecnológicas para evaluar los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay. D3.2: proyecciones de cambio climático del oleaje y residuo del nivel del mar en Uruguay. Proyecciones regionales del nivel medio del mar en Uruguay. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2020-08/Proyecciones%20de%20cambio%20clim%C3%A1tico%20del%20oleaje%20y%20residuo%20del%20nivel%20del%20mar%20en%20Uruguay_0.pdf

Tabla 4 – Distancia hasta la que llega la erosión de la playa ($d_{\text{erosión}}$) para las distintas tormentas en los perfiles analizados, medida desde la posición de la línea de costa al inicio de la tormenta, para el escenario de 20 cm de aumento del NMM.

Perfil	Retroceso por aumento del NMM	Retroceso por eventos extremos		Observaciones
		Tr 10 años	Tr 100 años	
Perfil 5	6 m	65 m	100 m	Se erosiona la primera duna parcial o completamente
Perfil 30	8 m	> Ancho de playa		Distancia limitada por el muro
Perfil 61	13 m			

Tabla 5 – Distancia hasta la que llega la erosión de la playa ($d_{\text{erosión}}$) para las distintas tormentas en los perfiles analizados, medida desde la posición de la línea de costa al inicio de la tormenta, para el escenario de 40 cm de aumento del NMM.

Perfil	Retroceso por aumento del NMM	Retroceso por eventos extremos		Observaciones
		Tr 10 años	Tr 100 años	
Perfil 5	12 m	85 m	95 m	Se erosiona la primera duna parcial o completamente
Perfil 30	19 m	> Ancho de playa		Distancia limitada por el muro
Perfil 61	28 m			

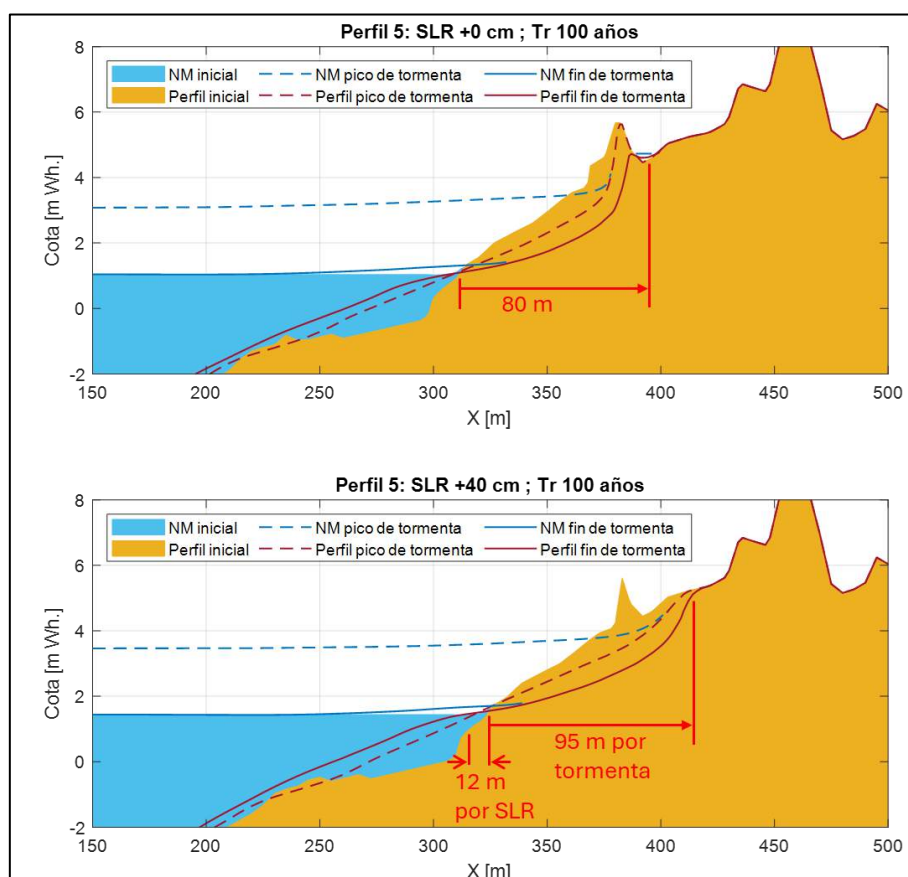


Figura 53 – Aumento de la distancia hasta la que llega la erosión en un evento de 100 años de período de retorno en el perfil 5, medida desde la línea de costa actual, al considera un aumento del NMM de +40 cm.

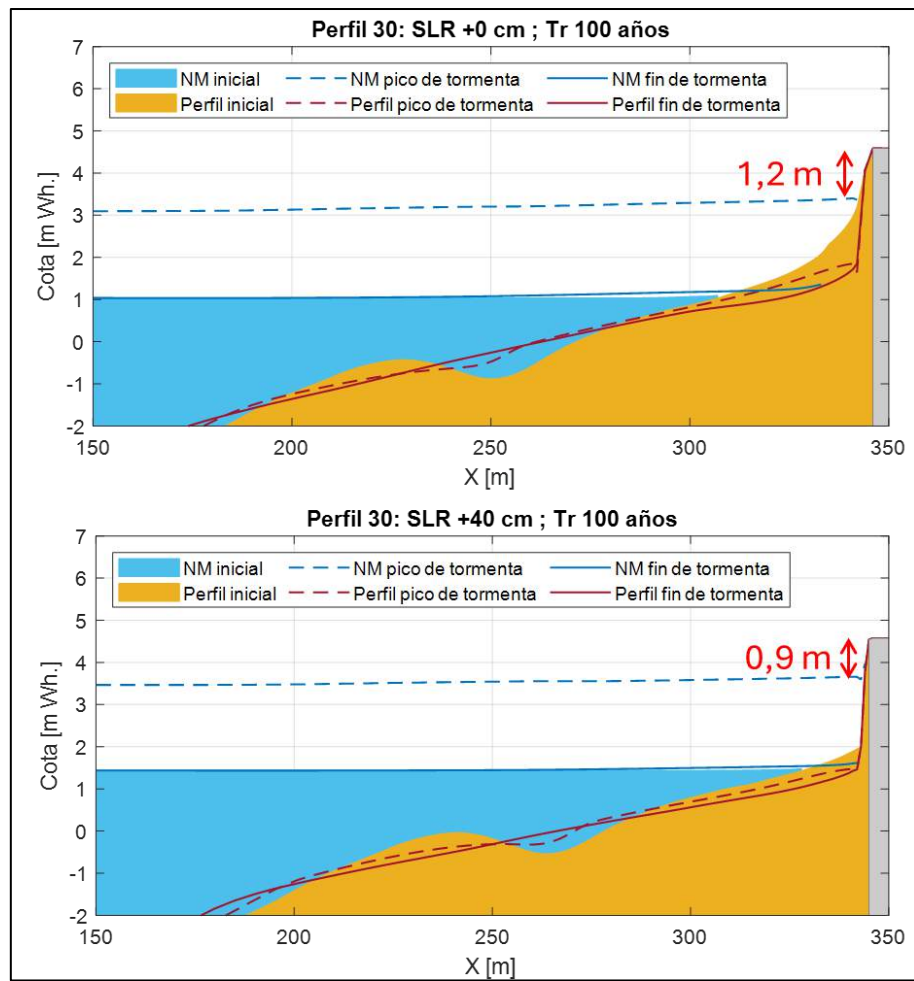


Figura 54 – Reducción del francobordo disponible para un evento de 100 años de periodo de retorno en el perfil 30, al considerar un aumento del NMM de +40 cm.

5.3 *Resumen de situación proyectada*

Del análisis presentado en las secciones precedentes (5.1 y 5.2) se desprenden las siguientes conclusiones:

- El aumento del NMM producto del cambio climático generaría un retroceso de entre 6 y 13 m de la línea de costa por cada 20 cm de aumento del NMM, lo que en algunos tramos implicaría una pérdida prácticamente total de la playa.
- Para tener espacio (y sedimentos) suficientes para atender la erosión de la playa producto de un aumento de 40 cm del NMM y un evento de tormenta de 100 años de período de retorno, es necesario disponer de aprox. 110 m de playa “sana” (sistema de playa y dunas), medidos desde la posición de la línea de costa actual.
- El aumento del NMM de hasta 40 cm no genera un aumento significativo de la amenaza de inundación costera por efecto del mar, aunque sí es esperable que aumente el rebase del oleaje en la rambla, así como los esfuerzos sobre la misma.

6 Propuesta de alternativas

Siguiendo la lógica propuesta en las “Estrategias para la protección de la costa” del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España¹⁷, las medidas de gestión orientadas a la protección y adaptación de la costa frente a los efectos del cambio climático pueden clasificarse en

- Medidas orientadas a **entender** mejor el sistema (e.g. estudios de disponibilidad de sedimentos, estudios de riesgo, actividades de formación y capacitación, monitorización de la costa, etc.).
- Medidas orientadas a **planificar** (e.g. revisión de procedimientos administrativos, coordinación entre administraciones, etc.).
- Medidas de **actuación** en el medio físico.

Dentro de las medidas de actuación en el medio físico se distinguen:

- Medidas **basadas en la naturaleza**, como ser la gestión del sedimento costero, la regeneración de playas y mantenimiento de playa seca, el mantenimiento y rehabilitación de ecosistemas costeros (sistemas dunares, marismas, humedales).
- Medidas de **estabilización de la costa**, consistente en la construcción de infraestructura orientada a limitar el movimiento de los sedimentos (e.g. espigones, diques exentos).
- Medidas de **defensa de la costa**, consistente en la construcción de infraestructura que fija la posición de la línea de costa impidiendo el retroceso de la misma y proporcionando protección a la infraestructura localizada en su trasdós (e.g. revestimientos, muros costeros).
- Medidas de retroceso controlado.

En esta misma línea, varios manuales y publicaciones relativas a la adaptación de la costa al cambio climático diferencian entre cinco posibles estrategias de actuación:

- **no hacer nada**,
- **retiro**,
- **mantener la línea de costa**,
- **avanzar la línea de costa**,
- **intervenciones limitadas**,

las cuales se presentan en forma esquemática en la Figura 55. Claramente esta última clasificación se enmarca dentro de lo que serían actuaciones en el medio físico, y tiene varias concordancias con la clasificación propuesta en las “Estrategias para la protección de la costa”. Por ejemplo, varias de las soluciones basadas en la naturaleza podrían encuadrarse en lo que se denomina intervenciones mínimas, mientras que las medidas de defensa de la costa corresponderían a la estrategia de mantener la línea de costa.

¹⁷ Ver: <https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-costa/estrategias-proteccion-costa/>

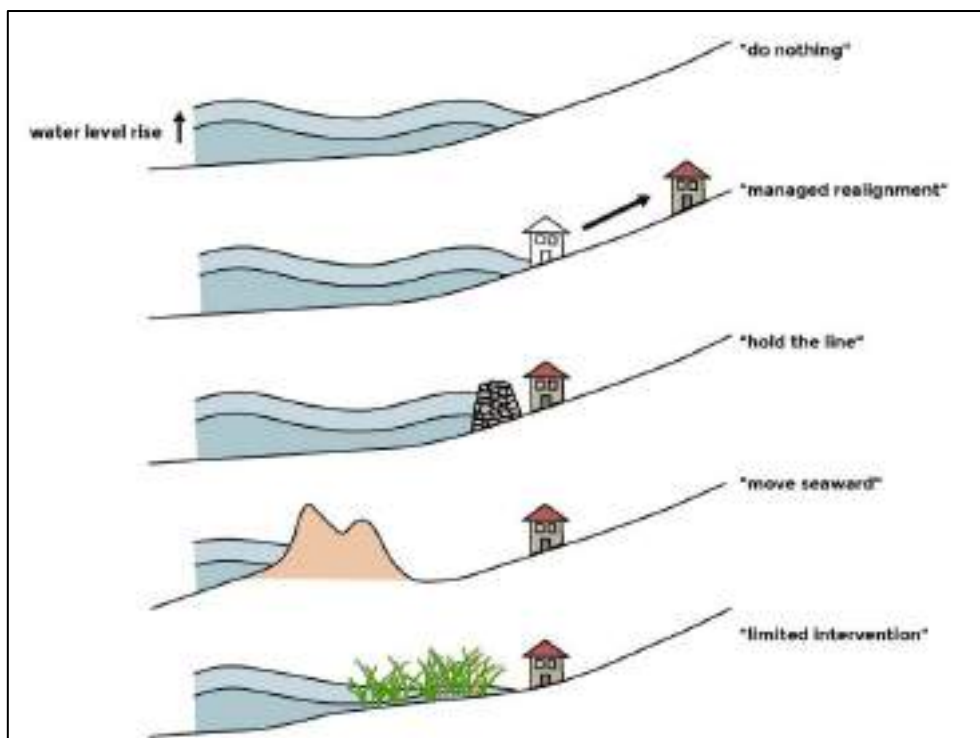


Figura 55 – Esquema de estrategias de defensa de la costa, tomado de Stelljes et al. (2018)¹⁸

En este proyecto el foco está en la propuesta de medidas de actuación en el medio físico, dando prioridad a las medidas basadas en la naturaleza, pero teniendo en cuenta que: (1) en ocasiones puede ser necesario o conveniente plantear soluciones híbridas, que combinen elementos “verdes”, o ecosistemas, con elementos “grises” u obras de infraestructura litoral tradicionales¹⁹, y (2) que las medidas de actuación que se propongan podrán requerir de medidas complementarias orientadas a entender y planificar para asegurar el buen funcionamiento y adaptación de las primeras.

La denominación de soluciones basadas en la naturaleza en este contexto se refiere a la creación o restauración de hábitats para proveer servicios de protección contra erosión e inundación costera, junto con otros beneficios. En este sentido, resulta relevante lo establecido en recientemente publicado “International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management” (Bridges et al. 2021)²⁰:

“El término características naturales y basadas en la naturaleza (NNBF, por sus siglas en inglés) se refiere al uso de las características del paisaje para producir beneficios FRM²¹. Los proyectos NNBF también pueden producir otros beneficios económicos, medioambientales y sociales

¹⁸ Stelljes, N., Martinez, G., & McGlade, K. (2018). Introduction to the RISC-KIT web based management guide for DRR in European coastal zones. *Coastal Engineering*, 134, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.09.012>

¹⁹ Morris, R. L., Boxshall, A., & Swearer, S. E. (2020). Climate-resilient coasts require diverse defence solutions. *Nature Climate Change*, 10(6), 485–487. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0798-9>

²⁰ Bridges, T. S., J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder, and R. K. Mohan, eds. 2021. *International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management*. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center. <https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/handle/11681/41946>

²¹ FRM se refiere a las medidas adoptadas para reducir los daños futuros causados a las personas y los bienes por las inundaciones y la erosión en los sistemas costeros y fluviales.

conocidos como beneficios colaterales (co-beneficios) de los NNBF. Estos elementos del paisaje pueden ser naturales (producidos exclusivamente por procesos naturales) o basados en la naturaleza (producidos por una combinación de procesos naturales e ingeniería humana) e incluyen elementos como playas, dunas, humedales, arrecifes e islas. Los elementos paisajísticos pueden utilizarse solos, combinados entre sí o en combinación con medidas convencionales de ingeniería como diques, muros de contención y otras estructuras.”

En este mismo manual se señala que, sin ser estrictamente sinónimos, existe una diversidad de términos en la bibliografía que hacen referencia a este mismo concepto (ver Figura 56).

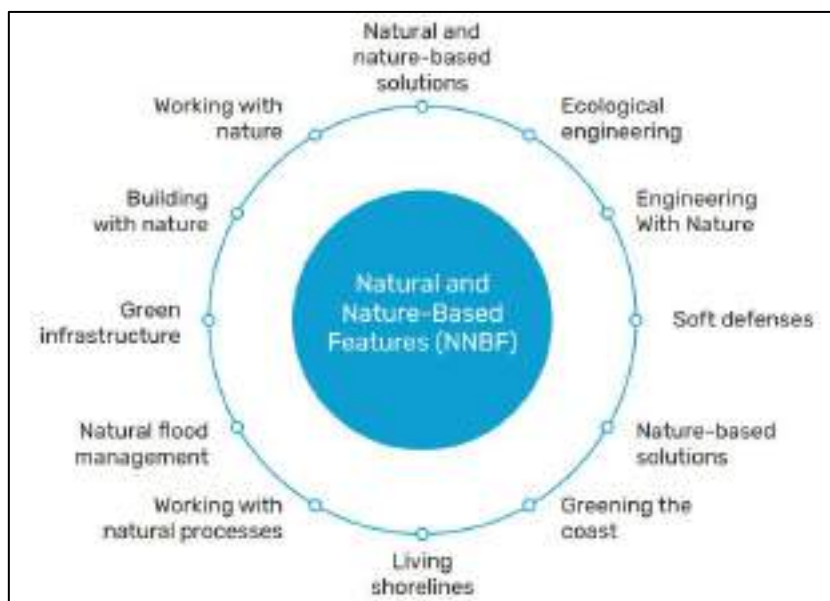


Figura 56 – Términos usados en la bibliografía en la que se abordan las soluciones basadas en la naturaleza (Figure 1.1 de Bridges et al. 2021).

6.1 Consideraciones preliminares respecto a potenciales estrategias

6.1.1 No hacer nada

Los resultados presentados previamente indican que de no tornarse medidas habrá tramos de playa en los que habrá una pérdida prácticamente total de la playa emergida, mientras que en otros se tendrá una reducción significativa del ancho de playa disponible. Esto tendrá impactos tanto sobre el potencial uso de la playa para actividades recreativas, e implicará una mayor exposición de la rambla a la acción del oleaje. En este último caso, de no hacerse nada para reforzar la estructura es esperable que aumente la frecuencia de ocurrencia de los fallos estructurales de la rambla.

En principio, el único tramo de playa en el que podría considerarse que no hacer nada no tendría consecuencias negativas es el tramo de playa ubicado al norte de Plaza Armenia. En este tramo de playa existe espacio suficiente para permitir que la playa se adapte por sí sola al aumento del NMM, aunque deberían considerarse acciones de tipo de ordenamiento territorial para asegurar que este espacio de mantenga disponible.

A fin de cuantificar las implicancias de no hacer nada, se analiza la pérdida de valor que implicaría esta opción a 2050, bajo las siguientes hipótesis:

- Solo se considera la pérdida de playa entre Plaza Armenia y el puerto; al norte de Plaza Armenia hay espacio suficiente para la adaptación de la playa, por lo que, si bien habrá un retroceso de la línea de costa y una pérdida de área, no habrá una pérdida de área de playa para recreación.
- La pérdida de playa a 2050 es la estimada para un aumento del NMM de +20 cm (ver Figura 50). La pérdida de playa a 2050 para el tramo considerado es 2,5 has.
- Se asume que la tasa de pérdida de playa será constante entre 2025 y 2050.
- Se toma de referencia el valor utilizado por IH Cantabria²² en su informe sobre Piriápolis, en donde se estimó el valor del servicio de la playa en 3,1 millones de dólar anuales por hectárea (valores estimados a 2018; aprox. el 90% de este valor corresponde al servicio de recreación).

La Figura 50 presenta la evolución temporal del acumulado de playa perdida y de la pérdida de valor anual asociada. Se observa que a 2050 se tendría una pérdida de casi 8 millones de USD por año, y que **la pérdida acumulada en el período es aprox. 102 millones de USD.**

A esto se debería sumar las obras de reparación o protección de aprox. de 2km de rambla que habría que acometer en la medida que su exposición al oleaje aumenta por la pérdida de playa. Asumiendo un costo estimado de USD 1.000 por metro lineal de rambla (valor actual), esto implicaría sumar 2 millones de USD adicionales al costo de la opción “no hacer nada”.

En consecuencia, y en diálogo con la contraparte, se considera que la opción “no hacer nada” no es una estrategia de adaptación viable, excepto en el tramo norte de la playa.

²² IH-Cantabria, 2019. DESARROLLO DE HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS, LA VULNERABILIDAD Y LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO E LA ZONA COSTERA DE URUGUAY. ENTREGABLE 4.3. CASOS PILOTO. PIRIÁPOLIS (MALDONADO).

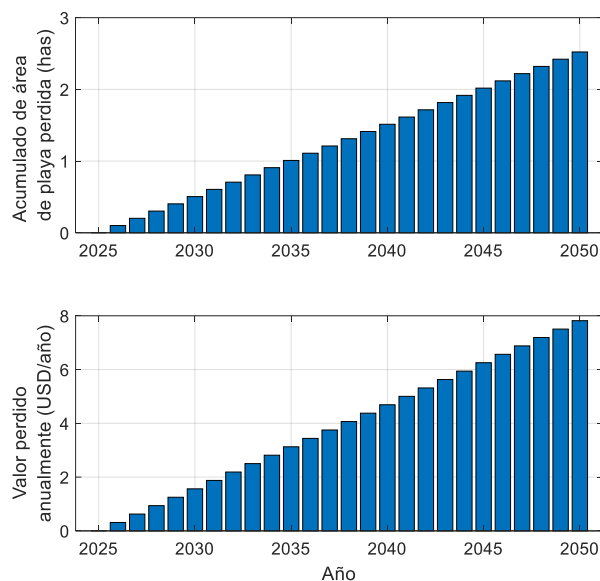


Figura 57 – Acumulado de área perdida entre 2025 y 2050 para el tramo de playa comprendido entre Plaza Armenia y el puerto (arriba) y el correspondiente valor perdido en cada año (abajo), calculado con valores estimados en 2018 (IH Cantabria).

6.1.2 Retiro

El retiro de la infraestructura actual, de cara a contar con un ancho de playa suficiente para propiciar la adaptación natural del sistema al aumento del NMM, implicaría retirar la rambla y parte de las viviendas construidas en primera línea, a lo largo de aprox. 2 km.

Visto el valor económico y patrimonial de la rambla de Piriápolis, el retiro no se considera una estrategia de adaptación viable.

6.1.3 Protección (mantener la línea)

Para el caso de Piriápolis esta estrategia implicaría permitir la pérdida de la playa a medida que aumenta el NMM, pero reforzar la estructura de la rambla para evitar el daño de esta y de los bienes ubicados por detrás.

A diferencia del retiro, esta estrategia de adaptación podría ser viable, si no para la totalidad de la playa, al menos para algunos tramos seleccionados.

6.1.4 Avanzar la línea de costa

Avanzar la línea de costa implicaría lograr un ancho de playa tal que asegure el espacio suficiente para que el sistema de playa pueda adaptarse al aumento del nivel medio del mar. Si se quiere que esta playa asegure la protección de la rambla, los resultados previos indican que se debería lograr una avance tal que asegure una distancia entre la rambla y la línea de costa de al menos 100 m.

Visto que la línea de costa actual ha requerido de obras de estabilización para mantenerse en el tiempo, no resulta recomendable avanzar la línea de costa mediante un relleno de arena sin implementar nuevas obras de estabilización, ya que el mismo tendería a erosionarse rápidamente y debería ser mantenido con regularidad.

Las potenciales obras de estabilización del relleno de arena son los campos de espigones, los cuales han mostrado su eficacia en el arco de playa, o los diques exentos o arrecifes artificiales.

El avance de la línea de costa, implementado mediante un relleno de arena acompañado de obras de estabilización, se considera una estrategia de adaptación viable para la playa, que podría asegurar el mantenimiento de una playa adecuada para el uso recreativo a la vez que se asegura la protección de la rambla.

6.1.5 Intervenciones limitadas

Dentro de las intervenciones limitadas se consideran dos posibilidades, ambas tendientes a aprovechar el superávit de sedimentos identificado en este trabajo:

Medidas orientadas a la reconstrucción de la duna:

Parte del tramo sur de la playa tiene en la actualidad ancho suficiente para intentar medidas de reconstrucción dunar. Estas medidas permitirían aumentar la capacidad de la playa de proteger a la rambla de los eventos extremos, y aumentarían su capacidad de adaptación del aumento del NMM, aunque no es esperable que logren avanzar la línea de costa ya que la misma se encuentra en una situación muy próxima al equilibrio estático.

Medidas orientadas a avanzar la línea de costa:

Esta sería una estrategia similar a la que se ha seguido entre los años 40 y los 80 del s.XX, cuando se fueron construyendo y alargando los campos de espigones para que los mismos retuvieran la arena que llega al sistema, avanzando así la línea de costa. La implementación de la estrategia implicaría alargar paulatinamente algunos de los espigones existentes, y en la medida en que se recupere ancho de playa, implementar las medidas tendientes a la recuperación de las dunas.

6.2 Definición de alternativas

En función de las consideraciones vertidas en la sección previa, se entiende que las dos alternativas viables para la adaptación de la playa de Piriápolis son:

- Alternativa A – Intervenciones limitadas
- Alternativa B – Avance y estabilización de la línea de costa

Ambas alternativas tendrían como objetivo alcanzar un ancho de playa mínimo de 110 m medido respecto a la rambla. La Figura 58 muestra la línea paralela a la rambla, a 110 m de esta última, junto con la posición actual de la línea de costa. Se observa que se requiere avanzar la línea de costa desde Plaza Armenia hasta prácticamente el extremo sur de la playa. El área total de playa a ganar es de aprox. 13 has, lo que implica un volumen de arena de aprox. 1.000.000 m³.



Figura 58 – Limite de la rambla (línea roja), línea de costa actual (línea naranja) y línea paralela a la rambla, a 110 m de distancia (línea verde punteada).

6.2.1 Alternativa A – Intervenciones limitadas

La alternativa de intervenciones limitadas implicaría el avance paulatino de los espigones existentes, comenzando por los ubicados al norte de la playa, y avanzando de norte a sur. Estas intervenciones serían obras de pequeña magnitud, alargando los espigones de a unos pocos cada vez (e.g. dos o tres espigones por vez) y longitudes acotadas (e.g. unos 15 m por espigón cada vez), verificando el desempeño de la medida durante unos años antes de proceder con una nueva intervención. En la medida que las ampliaciones de los espigones logren el avance de costa y se disponga de ancho suficiente, se podrían implementar medidas tendientes a la reconstrucción y revegetación de las dunas.

Según las estimaciones realizadas en este trabajo el aporte de sedimentos al sistema, disponible para el avance de la línea de costa, rondaría los 10.000 m³/año. Esto implica que esta medida no lograría acumular de aquí a 2075 la cantidad de sedimentos necesaria para atender un aumento del NMM de 40 cm.

Sin desmedro de lo anterior, se entiende que esta es una medida de relativamente bajo costo y bajo arrepentimiento, que puede implementarse mientras no se disponga de los medios para implementar medidas más ambiciosas, como las de la Alternativa 2.

6.2.2 Alternativa B – Avance y estabilización de la línea de costa

La alternativa de avance y estabilización de la línea de costa implica el vertido de un aprox. 1.000.000 m³ de arena a la playa en una única etapa de obra, junto con la construcción de las obras de estabilización, las cuales a priori podrían ser:

Alternativa B.i: campo de espigones “cortos” (Figura 59):

En este caso la solución plateada sería paisajísticamente similar a la actual, en cuanto a que la continuidad de la playa estaría interrumpida cada aprox. 200 m por la presencia de un espigón, aunque con algunas diferencias significativas: (i) habría ancho suficiente de playa para realizar una reconstrucción y revegetación de dunas, y estas dunas podrían generar un campo continuo, no interrumpido por los espigones, (ii) la tipología de los espigones sería preferencialmente de material suelto, no de tipo muro vertical de hormigón como es en la actualidad.

Alternativa B.ii: campo de espigones “largos” o “de cierre” (Figura 60):

Esta alternativa generaría una serie de arcos de playa de mayor longitud, lo que le podría dar a la playa un aspecto de mayor continuidad. De forma similar a la anterior, habría ancho suficiente de playa para realizar la reconstrucción y revegetación del campo de dunas, y los espigones serían fundamentalmente de material suelto. En este caso los espigones deberán construirse hasta profundidades mayores que en la alternativa anterior, lo que se prevé implicará mayor volumen de material y podrá requerir piezas de coraza de mayor tamaño que los de la Alternativa B.i. A su vez, al permitir el desarrollo de pequeños arcos de playa, el ancho de la playa será menos uniforme que en la alternativa anterior, lo que requerirá alcanzar mayores anchos de playa que los estrictamente necesarios en los extremos oeste de los arcos para asegurar el ancho mínimo requerido en los extremos este, lo que se prevé requerirá un volumen de arena de relleno mayor al de la Alternativa B.i.

Alternativa B.iii: diques exentos o arrecifes artificiales (Figura 61):

Esta opción implicaría la construcción de diques exentos, los cuales podrían ser emergidos o sumergidos total o parcialmente, lo que reduciría su impacto visual, y podrían diseñarse de forma tal de propiciar la regeneración de ecosistemas marinos (arrecifes artificiales). En este caso la continuidad de la playa no se vería interrumpida, pero la línea de costa tendría una configuración con salientes y/o tómbolos.

A diferencia de los espigones, que se construyen desde tierra, los diques exentos pueden construirse tanto desde tierra (generando una obra provisoria que permita el acceso de la maquinaria) o desde el mar (trasladando los materiales y los equipos en barcas); en el primer caso el impacto de la obra sobre la playa, si bien temporal, puede ser importante, mientras que en el segundo se podría reducir el impacto sobre la playa, pero es posible que los costos de la obra sean mayores.

La Figura 62 presenta un ejemplo de implementación de estas medidas en otras playas. Si bien cada playa tiene sus particularidades y por lo tanto el diseño de las alternativas deberá adaptarse a las de la playa de Piriápolis, se considera que esta figura permite hacerse una mejor idea de cómo se materializan estas obras.

Cabe señalar que pueden haber soluciones que combinen elementos de las tres alternativas de estabilización planteadas (e.g. un dique exento en el tramo norte, acompañado de campos de espigones hacia el sur, o viceversa).

6.2.3 Respetto a la posible fuente de arena para la alternativa 2

A priori, dado los volúmenes de arena involucrados, se considera que el relleno de la playa solo será viable en la medida que se realice mediante medios marítimos de dragado de arena *offshore* y refulado a la playa.

El Coastal Engineering Manual del US.Army indica que no es recomendable utilizar como zona de préstamo para el relleno de playa aquella que esté a una distancia de la playa menor a la definida por la isóbata de profundidad igual a dos veces la profundidad de cierre. Para la playa de Piriápolis esta profundidad corresponde a la isóbata -8.2 m Wh. La Figura 63 presenta la superposición del mapa de muestreos de sedimentos de fondo, suministrado por la Intendencia de Maldonado²³, con esta isóbata. Se observa que el muestreo cubre mayormente la zona en la que no se recomienda dragar, aunque existen algunas muestras superficiales tomadas a profundidades mayores a -8.2 m Wh., cuya granulometría puede ser considerada adecuada para la ejecución del relleno (e.g. comparar muestra M4 costera, Figura 64, con la de las muestras M8 y M9, Figura 65 y Figura 66 respectivamente).

²³ Las muestras de fondo y la batimetría fueron realizados por la empresa ACRUX Marine Services. Las granulometrías de las muestras de fondo fueron realizadas por la empresa INSUELOS (informe 1006-22), siguiendo los métodos de ensayo dados en ASTM D6913 - ASTM D1140.

6.2.4 Reunión del 23 de febrero de 2024 para discusión de alternativas

El día 23 de febrero del corriente se realizó una reunión en la Intendencia de Maldonado, con participación de técnicos del IMFIA, el Ministerio de Ambiente y la Intendencia, en la cual se presentaron los resultados contenidos en este informe.

En esta reunión se definió que la Alternativa B sería la de preferencia de la contraparte, sin llegar a definirse una preferencia clara entre las distintas opciones de estabilización, por lo que se acordó que se avanzará en la cuantificación de la geometría y volúmenes implicados en las tres opciones planteadas, para posteriormente definir cuál de ellas se avanzará a nivel de anteproyecto.



Figura 59 – Esquema conceptual de la Alternativa B.i: relleno y estabilización con campo de espigones “cortos”.



Figura 60 – Esquema conceptual de la Alternativa B.ii: relleno y estabilización con espigones “largos” o “de cierre”.



Figura 61 – Esquema conceptual de la Alternativa B.iii: relleno y estabilización con diques exentos o arrecifes artificiales.



Figura 62 – Ejemplo de obras similares a las sugeridas en las alternativas B.i (arriba), B.ii (centro) y B.iii (abajo), construidas en otras playas en el extranjero.

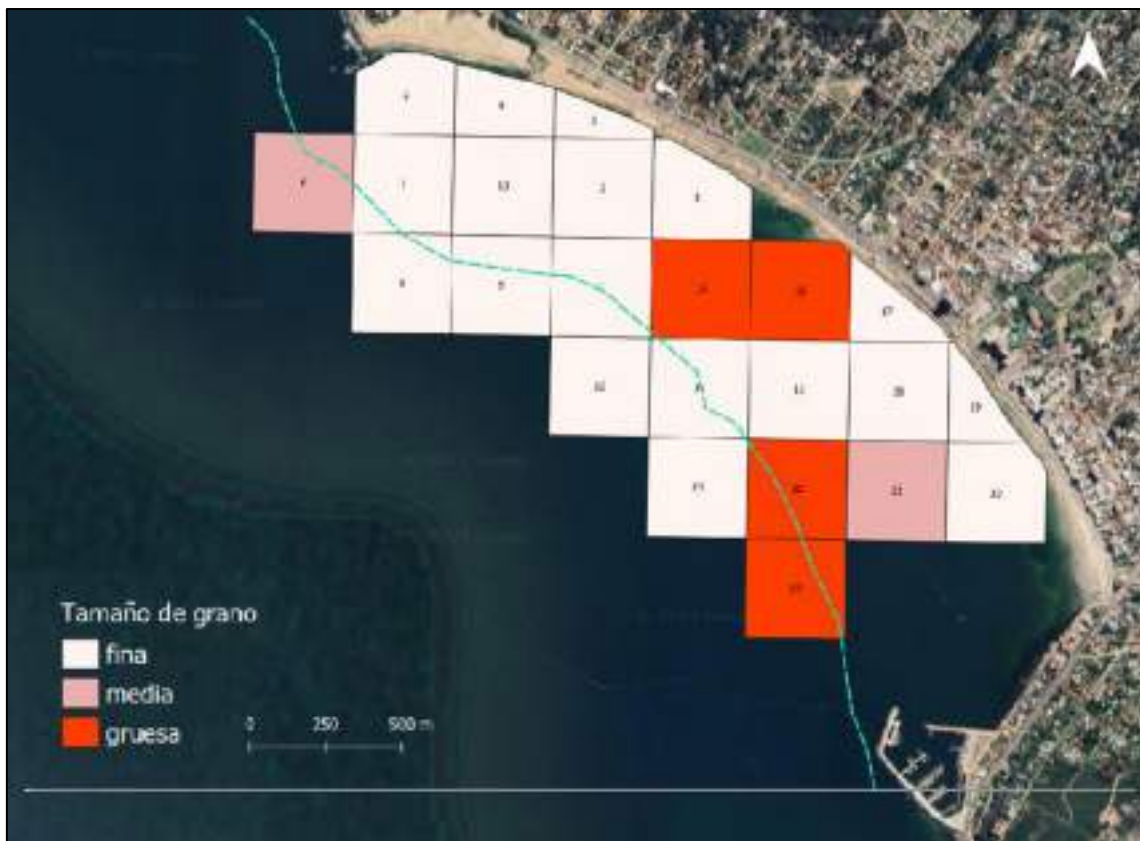


Figura 63 – Superposición del mapa de muestreos de sedimentos de fondo, suministrado por la Intendencia de Maldonado, con la isóbata -8.2 m Wh.

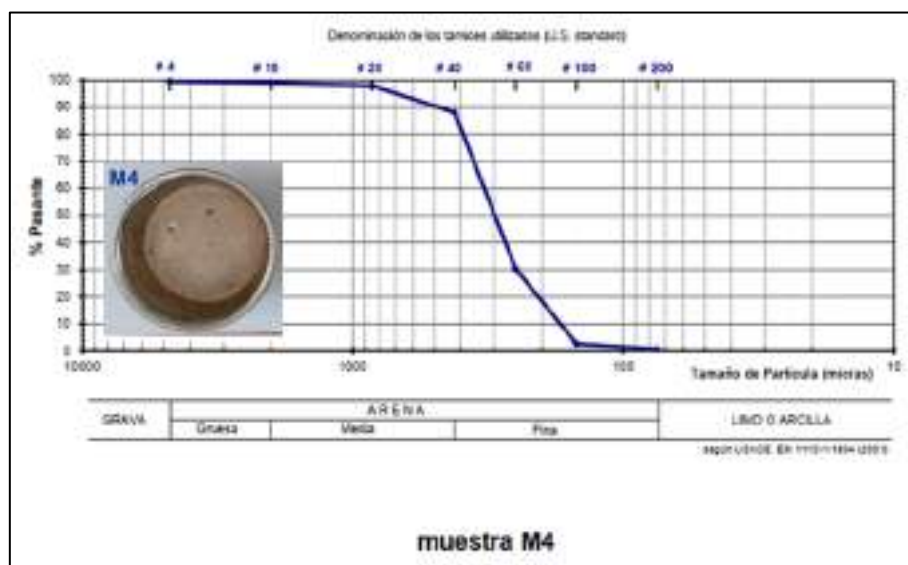


Figura 64 – Granulometría y foto de la muestra M4.

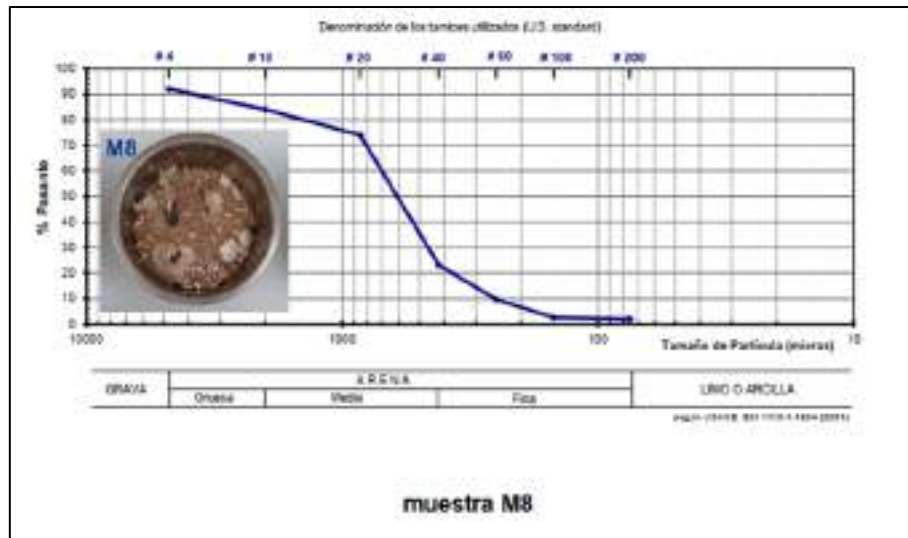


Figura 65 – Granulometría y foto de la muestra M8.

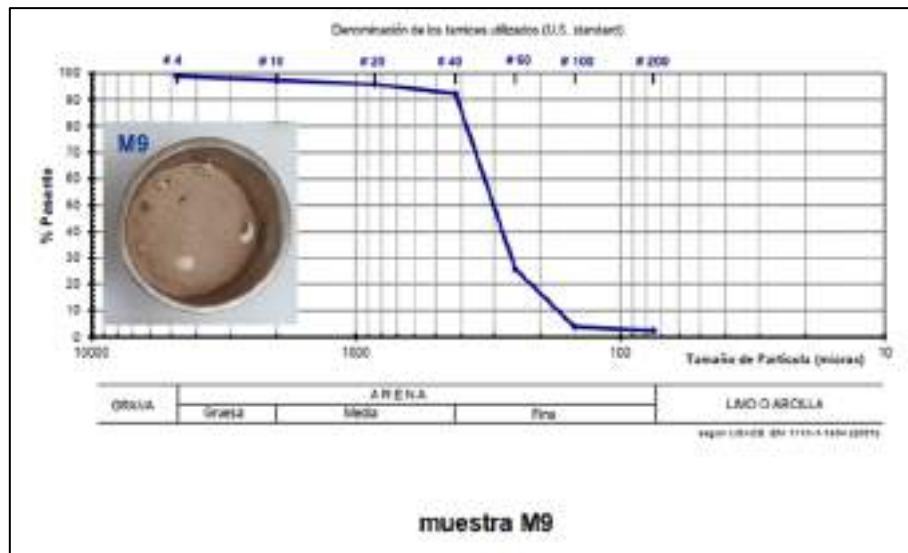


Figura 66 – Granulometría y muestra de la muestra M9.

7 Prediseño de alternativas

Se presenta a continuación el prediseño hidráulico básico de dos alternativas, basadas en los diseños conceptuales B.i, B.ii y B.iii:

Alternativa 1: combina un espigón, necesario para dar apoyo y avanzar la línea de costa en el extremo norte, con una serie de diques exentos.

Alternativa 1: combina espigones de distinto tamaño y forma con el fin de generar un avance de playa estable y con menor grado de interrupciones que el actual (esta alternativa es un punto intermedio entre los diseños conceptuales B.ii y B.iii).

En primera instancia se discuten una serie de aspectos generales, comunes al diseño de ambas alternativas. Luego se presenta el diseño de cada una de las alternativas.

7.1 Generalidades respecto al diseño en planta del relleno de arena y las obras litorales

El diseño en planta de las alternativas se realiza de forma tal que:

- (1) la línea de costa propuesta esté por delante de la línea a proteger señalada en la Figura 58, si no en todo el tramo de costa al menos en la amplia mayoría del mismo.
- (2) la línea de costa propuesta corresponda a un estado de equilibrio estático a largo plazo, teniendo en cuenta los puntos de difracción del oleaje actuales y los que se incorporen mediante la construcción de obras litorales (espigones y diques exentos).

Para la definición de la forma de equilibrio en planta a largo plazo se utiliza la parábola de equilibrio, en su versión propuesta por González & Medina (2001)²⁴, implementada en la herramienta SMC²⁵, de la Universidad de Cantabria.

Para el caso de los espigones, se define la posición de equilibrio a largo plazo de la línea de costa aguas arriba de los mismos a partir de la situación actual. La distancia que existe actualmente entre el morro de los espigones y la línea de costa aguas arriba de los mismos está en torno a 20 m o 30 m. Para el prediseño se considera que la misma es 30 m.

Teniendo en cuenta que: (i) las alternativas se diseñan usando formas de equilibrio en planta, y (ii) el sistema no es deficitario de arena, se considera que no es esperable que ocurran pérdidas sistemáticas y significativas del relleno en la vida útil de la obra. Sin desmedro de lo anterior, en este tipo de proyectos siempre puede existir la necesidad de ajustes o mantenimientos puntuales (e.g. por la ocurrencia de eventos extremos, o desviaciones respecto al comportamiento esperado) que habrá que intentar cuantificar y prever (al menos mediante un análisis de sensibilidad) durante el proyecto ejecutivo. En este sentido, la disponibilidad de datos de oleaje y corrientes medidos en el sitio puede ayudar a cotar estas incertidumbres.

²⁴ González, M., Medina, R., Gonzalez-Ondina, J., Osorio, A., Méndez, F. J., & García, E. (2007). An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. Computers & Geosciences, 33(7), 916–931. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.12.005>

²⁵ Gonzalez, M., & Medina, R. (2001). On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. 209–225.

Sin desmedro de lo anterior, el retroceso de la línea de costa por efecto del aumento del NMM se considera inevitable y su magnitud, en todas las alternativas diseñadas, será similar a lo estimado para la configuración actual de la playa en la sección 5.1.

Por otro lado, las configuraciones en planta propuestas no solo se diseñan considerando la forma en equilibrio en planta a largo plazo, sino que se tiene la precaución de no interrumpir el transporte litoral, evitando la formación de tómbolos y manteniendo la distancia actual entre la línea de costa y los morros de los espigones. Por lo tanto, no es esperable que las obras propuestas impacten en la morfología de las playas ubicadas aguas abajo (en el sentido de la corriente litoral) de la obra. Sin desmedro de lo anterior, este tipo de obra requerirá un estudio de impacto ambiental, para el cual se recomienda incorporar estudios de morfodinámica de playas de mayor detalle y extensión espacial, a fin de tener mayor tranquilidad en este sentido.

7.2 Generalidades respecto al diseño en alzado y la verificación de las obras litorales

7.2.1 Materiales y aspectos constructivos

Se considera para el diseño de espigones y diques exentos que el material utilizado para la construcción de las distintas capas será granito, cuya densidad se asume 2.600 kg/m^3 a efectos del cálculo. La densidad y el resto de las características de la roca que se mencionan en este documento (intrínsecas, propias de la roca, y extrínsecas, asociadas al proceso de producción, traslado y construcción) deberán ser verificadas durante la etapa de diseño ejecutivo y, de ser necesario, el diseño de las obras litorales deberá ajustarse acorde a las características del material y el proceso constructivo a usar en la ejecución de la obra.

Todas las obras litorales se diseñan para construir desde tierra y por tanto su cota de coronamiento se establece igual o superior al nivel medio del mar, y el ancho de coronación es siempre mayor a 3,5 m. En el caso de diques exentos la construcción desde tierra requerirá la ejecución de obras provisionales para el acceso de los materiales y equipos desde tierra, las cuales se prevé podrán ser ejecutadas una vez esté el relleno de playa avanzado y utilizando este mismo material (arena del relleno).

A efecto de los cálculos en el prediseño se asume que la coraza será colocada de forma aleatoria. La Figura 67 presenta un ejemplo de rocas colocadas de forma aleatoria. Debe tenerse en cuenta que la colocación de la roca de forma aleatoria no es equivalente a volcar el material; la colocación de la roca de forma aleatoria implica:

- las rocas son colocadas de a una, comenzando desde el pie y subiendo en el talud desde allí, avanzando con las dos capas de coraza al unísono,
- la coraza no debe soltarse desde más de 30 cm de altura y su colocación no debe afectar al talud de la subcapa,
- el equipo de construcción tiene capacidad de ajustar la posición de la roca y, de ser necesario, volver a levantarla y cambiarla de lugar.

Durante la fase de proyecto ejecutivo se recomienda considerar la viabilidad de utilizar el método de “colocación selectiva” (ver Figura 68), el cual permite obtener mayor estabilidad de

la coraza mediante una colocación cuidadosa que asegure mayor trabazón entre las piezas, y podría mejorar el aspecto estético de las obras litorales.



Figura 67 – Ejemplo de enrocado colocado de forma aleatoria (Figure VI-4-2 del Coastal Engineering Manual).



Figura 68 – Ejemplo de enrocado colocado de forma selectiva (Figure VI-4-3 del Coastal Engineering Manual).

7.2.2 *Requisitos de diseño*

Para la definición de los requisitos de diseño de las obras litorales se utilizan las Recomendaciones de Obras Marítimas (ROM) de Puertos del Estado de España. En particular se recurre a la ROM 1.0-09 (Puertos del Estado, 2009) a fin de definir la vida útil y fiabilidad mínima del espigón.

Las figuras 2.2.33 y 2.2.34 de la ROM 1.0-09 (Puertos del Estado, 2009), las cuales se reproducen en la Figura 69 y la Figura 70 de este documento, muestran que para obras de *regeneración y defensa de playas*, los vida útil y la probabilidad de fallo máxima admisible asociada a ELU son 15 años y 20%, respectivamente, mientras que para obras de protección y defensa de márgenes estos requisitos son 15 a 50 años y 10%, con la vida útil dependiendo del monto de inversión inicial.

Teniendo en cuenta que existen pocos antecedentes a nivel nacional en cuanto a la construcción de obras litorales de esta magnitud, se opta por considerar los siguientes requisitos de diseño:

- Vida útil 25 años (igual al horizonte del proyecto).
- Probabilidad de fallo máxima admisible 20%.

En lo que sigue las verificaciones de los modos de fallo de las obras litorales se realizan mediante técnicas relativamente simplificadas, basadas en métodos de Nivel I o semideterministas, para cuya aplicación se define una o más tormentas de diseño cuyo período de retorno es coherente con los requisitos de probabilidad de fallo máxima admisible en la vida útil. Para esto se calcula el período de retorno del fallo asumiendo independencia entre años consecutivos:

$$Tr_{fallo} = \left[1 - (1 - p_f)^{\frac{1}{vu}} \right]^{-1} \quad (\text{Ec. 1})$$

De donde surge que para una vida útil de 25 años y una probabilidad de fallo máxima de 0,2, el período de retorno del fallo (asociado a las tormentas de diseño), es aprox. 115 años.

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA			ÍNDICE IRE ¹		VIDA ÚTIL MÍNIMA (V _m) ⁷ (años)
ÁREAS PORTUARIAS	PUERTO COMERCIAL	Puertos abiertos a todo-tipo de tráficos	r ₃	Alto	50
		Puertos para tráficos especializados	r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	PUERTO PESQUERO		r ₂	Medio	25
	PUERTO NAÚTICO-DEPORTIVO		r ₂	Medio	25
	INDUSTRIAL		r ₂ (r ₃) ¹	Medio (alto) ¹	25 (50) ¹
	MILITAR		r ₂ (r ₃) ²	Medio (alto) ²	25 (50) ²
	PROTECCIÓN DE RELLENOS O DE MÁRGENES		r ₂ (r ₃) ³	Medio (alto) ³	25 (50) ³
	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ⁴		r ₃	Alto	50
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO		r ₂ (r ₃) ⁵	Medio (alto) ⁵	25 (50) ⁵
ÁREAS LITORALES	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES		r ₁ (r ₃) ⁶	Bajo (alto) ⁵	15 (50) ⁷
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS		r ₁	Bajo	15

¹ El índice IRE se elevará a r₂ cuando el tráfico esté asociado con el suministro energético o con materia primas minerales estratégicos y no se disponga de instalaciones alternativas adecuadas para su manipulación y/o almacenamiento.

² El índice IRE se elevará a r₃ cuando la instalación militar se considere esencial para la defensa nacional.

³ En obras de protección de rellenos o de defensa de márgenes se tomará un índice IRE igual al señalado para el área portuaria en que se localiza.

⁴ Se entienden como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquellos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.

⁵ El índice IRE se elevará a r₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido esté asociado con el abastecimiento de agua para uso urbano o con la producción energética.

⁶ El índice IRE se elevará a r₃ cuando en su zona de afección se localicen edificaciones o instalaciones industriales.

⁷ Los índices inferiores a r₃ de la tabla se elevarán un grado por cada 30 M€ de coste de inversión inicial de la obra de abrigo.

Figura 69 – Valores de IRE y vida útil mínima para distintas obras marítimas (figura 2.2.33 de la ROM 1.0-09).

TIPO DE ÁREA ABRIGADA O PROTEGIDA				ÍNDICE ISA		P _{FALLU}	P _{FALLU}	
ÁREAS PORTUARIAS	COMER-CIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₁	Alto	0.01	0.07	
			Pasajeros y Mercancías no peligrosas ¹	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s ₃	No significativo	0.20	0.20	
	PESQUERO	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₂	Bajo	0.10	0.10	
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₃	No signif.	0.20	0.20	
	NÁUTICO-DEPORT.	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₂	Bajo	0.10	0.10	
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₃	No signif.	0.20	0.20	
	INDUS-TRIAL	Con zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₁	Alto	0.01	0.07	
			Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
		Sin zonas de almacenamiento u operación de mercancías o pasajeros adosadas al dique		s ₃	No significativo	0.20	0.20	
	MILITAR	Con zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique ¹		s ₁	Alto	0.01	0.07	
		Sin zonas de almacenamiento u operación adosadas al dique		s ₃	No signif.	0.20	0.20	
	PROTECCIÓN *	Con zonas de almacenamiento adosadas al dique ¹	Mercancías peligrosas ²	s ₁	Alto	0.01	0.07	
			Mercancías no peligrosas	s ₂	Bajo	0.10	0.10	
ÁREAS LITORALES	DEFENSA ANTE GRANDES INUNDACIONES ³			s ₄	Muy alto	0.0001	0.07	
	PROTECCIÓN DE TOMA DE AGUA O PUNTO DE VERTIDO			s ₂ (s ₃) ⁴	Bajo (alto) ⁴	0.10 0.0001	0.10 0.07	
	PROTECCIÓN Y DEFENSA DE MÁRGENES			s ₂ (s ₄) ⁵	Bajo (muy alto) ⁵	0.10 0.0001	0.10 0.07	
	REGENERACIÓN Y DEFENSA DE PLAYAS			s ₃	No signif.	0.20	0.20	
	* PROTECCIÓN DE RELLENOS O MÁRGENES.							

* PROTECCIÓN DE RELLENOS O MÁRGENES.

¹ En el caso de que en la superficie adosada al dique esté previsto que se ubiquen edificaciones (p.e. estaciones marítimas, lonjas, ...), depósitos o silos que pudieran resultar afectados en el caso de fallo de la obra de abrigo, se considerará un índice ISA muy alto (s₄) (P_{FALLU}=0.0001; P_{FALLU} = 0.007).

² Se consideran mercancías peligrosas los grupos de de sustancias prioritarias incluídas en el anexo X de la Directiva Marco del Agua (Decisión 2455/2001/CE) en el inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER: Decisión 2004/479/CE); y en el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías Peligrosas (Real Decreto 145/1989). (Ver ROM 5.1-05).

³ Se entiende como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquellos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.

⁴ El índice ISA se elevará a s₃ cuando la toma de agua o el punto de vertido están asociados con el abastecimiento de agua para uso urbano o industrial o con la producción energética.

⁵ El índice ISA se elevará a s₄ cuando en caso de fallo pudieran resultar afectadas edificaciones u otras instalaciones industriales.

* PROTECCIÓN DE RELLENOS O MÁRGENES.

¹ En el caso de que en la superficie adosada al dique esté previsto que se ubiquen edificaciones (por estaciones marítimas, lonjas...), depósitos o silos que pudieran resultar afectados en el caso de fallo de la obra de abrigo, se considerará un índice ISA muy alto (s₄) (P_{fallu}=0.0001; P_{fallu} = 0.007).

² Se consideran mercancías peligrosas los grupos de sustancias prioritarias incluidas en el anexo X de la Directiva Marco del Agua (Decisión 2455/2001/CE) en el inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER: Decisión 2004/479/CE), y en el Reglamento Nacional de Admisión, Manipulación y Almacenamiento de Mercancías Peligrosas (Real Decreto 145/1985), (Ver ROM 5.1-05).

³ Se entiende como diques de defensa ante grandes inundaciones, aquellos que en caso de fallo podrían producir importantes inundaciones en el territorio.

⁴ El índice ISA se elevará a s₂ cuando la toma de agua o el punto de vertido estén asociados con el abastecimiento de agua para uso urbano o industrial o con la producción energética.

⁵ El índice ISA se elevará a s₄ cuando en caso de fallo pudieran resultar afectadas edificaciones o otras instalaciones industriales.

Figura 70 – Valores de ISA y probabilidad de fallo máxima admisible para distintas obras marítimas (figura 2.2.34 de la ROM 1.0-09).

7.2.3 Estados de mar considerados

Las condiciones extremas de oleaje son muy similares a lo largo del arco de playa, en el tramo en el que se implantan las obras litorales (fuera del abrigo generado por la difracción en el morro del dique de abrigo del puerto), por lo que se considera un único conjunto de estados de mar, representativos de las condiciones de 115 años de período de retorno y de condiciones de oleaje limitado por fondo, el cual podría ser más desfavorable que las condiciones extremas para

alguna estructuras de bajo coronamiento. La Tabla 6 presenta el conjunto de condiciones utilizadas para la verificación de las estructuras.

El valor de altura y período de olea al pie de dique, utilizado para el dimensionado de las obras litorales, se calcula forzando el modelo SWAN con los valores de la Tabla 6, considerando batimetría actual o futura, según corresponda en cada caso, y considerando oleaje de incidencia normal a la playa.

Tabla 6 – Estados de mar utilizados para el dimensionado de las obras litorales.

Caso	Hm0 [m]	Tp [s]	SL [m Wh.]	Observación
1	4.75	11	+3.1	Hm0 y SL con período de retorno 100 años
2	4.75	11	+2.75	Hm0 con período de retorno 100 años y SL mínimo esperable para esa condición.
3	4.2	11	+2.5	Máximo oleaje esperable para SL=+2.5 m Wh.
4	4.0	10	+2.0	Máximo oleaje esperable para SL=+2.0 m Wh.
5	3.6	9	+1.5	Máximo oleaje esperable para SL=+1.5 m Wh.
6	3.2	9	+1.0	Máximo oleaje esperable para SL=+1.0 m Wh.

7.2.4 Modos de fallo y ecuaciones de verificación

Para las obras litorales se consideran secciones tipo con las siguientes características:

- taludes exteriores en el rango 1V:1,5H - 1V:2H
- coraza en al menos dos capas de roca con peso medio W; cuando corresponda, subcapa en dos capas de roca con peso medio W/10 y núcleo de piedra partida menor a W/200,

Con estas consideraciones, el modo de fallo principal a considerar en esta etapa es la erosión o pérdida de piezas del talud exterior y del coronamiento. En esta etapa se considera que el resto de los modos de fallo no aportan a la probabilidad de fallo de la obra; éstos se listan a continuación, indicando las razones consideradas para catalogarlos como modos de fallo no principales:

- Erosión de la coraza interior por rebase: se toma coraza interior igual a exterior.
- Erosión del pie de la estructura: se considera el enrocado del pie de igual tamaño que la coraza o la subcapa; en el primer caso no es esperable pérdida de piezas del pie, mientras que en el segundo deberá verificarse su resistencia en laboratorio y, de ser necesario podrán sustituirse por piezas de tamaño similar a las de la coraza.
- En todos los casos se considera un pie que funcione como “falling apron” o un área de protección contra la erosión. El tamaño de estas deberá ser ajustado en el proyecto ejecutivo.
- Pérdida de material del núcleo: la subcapa y el núcleo deberán verificar condiciones de filtro (a verificar en la etapa de proyecto ejecutivo, una vez identificada la cantera y definido el método constructivo).
- Asentamiento por erosión interna del material de fundación: se prevé la colocación de geotextil para la fundación de todas las obras litorales.

No se prevé que existan modos de fallo geotécnicos relevantes, pero se recomienda prever una campaña de cateos durante la etapa de proyecto ejecutivo, así como la verificación de los asentamientos esperables, **en particular para las obras que se construyan sobre la arena del relleno.**

La definición a nivel de anteproyecto del tamaño de las piezas de la coraza se realiza utilizando las siguientes formulaciones, según corresponda:

- Van der Meer para aguas profundas (Rock Manual²⁶, sección 5.2.2.2)
- Van der Meer para aguas poco profundas (Rock Manual, sección 5.2.2.2)
- Corrección propuesta por van der Meer para diques rebasarles (Rock Manual, sección 5.2.2.4)
- Formulación propuesta por Burcharth et al. (2006)²⁷ para diques sumergidos
- Corrección propuesta por van Gent (2014)²⁸ para incidencia oblicua.

El tamaño de las capas inferiores y núcleo se realiza a partir del tamaño de la coraza, considerando que si el peso de las piezas de la coraza es W , el de la subcapa deberá ser $W/10$ y el del núcleo deberá estar en el rango $W/200$ - $W/4000$.

Se hace notar que:

- Estas formulaciones son de por sí únicamente válidas para la etapa de prediseño. Además, en este caso algunas de ellas se utilizan por fuera del rango de los experimentos que las sustentan. Por lo tanto, **para el diseño final (ejecutivo) de la obra se recomienda realizar ensayos de laboratorio a escala reducida para verificar la estabilidad de las obras propuestas.**
- En todos los casos W_{50} es el valor de masa que es superado por el 50% de las piezas, medido en masa (i.e. el 50% de la masa de la coraza está en piezas con masa mayor a W_{50}), y D_{n50} es el lado del cubo equivalente, con masa W_{50} .
- Tanto la coraza como las capas inferiores se asumen con **granulometría estrecha**, tal que $D_{85}/D_{15} < 1,5$ (o M_{85}/M_{15} en el rango 1,7 – 2,7).

7.3 Generalidades respecto al perfil y el relleno de playa

7.3.1 Perfil de diseño

En la sección 6.2.3 se señaló que la información disponible sugiere que podría haber disponibilidad de arena para la ejecución del relleno de playa en la zona *off-shore* ubicada frente al arco de playa de Piriápolis (ver sección 6.2.3 y Figura 63). En función de las curvas granulométricas disponibles, correspondientes a las muestras de material de fondo tomadas en la zona, se asumirá que el diámetro medio de la arena de la zona de préstamos es $D_{50} = 0.4$ mm.

²⁶ CIRIA, CUR, CETMEF (2007). The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London.

²⁷ Burcharth, H. F., Kramer, M., Lamberti, A., & Zanuttigh, B. (2006). Structural stability of detached low crested breakwaters. Coastal Engineering, 53(4), 381–394.

²⁸ Van Gent, M. R. A. (2014). Oblique wave attack on rubble mound breakwaters. Coastal Engineering, 88, 43–54.

Este es algo mayor al diámetro medio de las muestras costeras, las cuales están en torno a $D50=0.3$ mm.

El perfil de playa de diseño se define combinando:

- (1) la pendiente de la playa emergida que surge de los perfiles medidos en sitio, en el tramo Norte de la playa, y
- (2) el perfil de equilibrio correspondiente al diámetro medio de la arena considerada para el relleno de playa ($D50=0.4$ mm), para la parte sumergida del perfil

La cota de berma de la playa es aprox. +2,5 m Wh. Desde la cota de berma hasta el nivel medio del mar (aprox. +1 m Wh.) se asume pendiente uniforme igual a 4,6 %. Desde el nivel medio del mar hasta la profundidad de cierre (aprox. -3 m Wh.) se asume el perfil de equilibrio para $D50=0,4$ mm, dado por:

$$y = 0,145x^{2/3} \quad (\text{Ec. 1})$$

en donde y es la profundidad respecto al nivel medio del mar y x es la progresiva medida desde la línea de costa correspondiente al nivel medio del mar.

De la información topográfica del tramo Norte de la playa, en donde existe al día de hoy un sistema de dunas que puede considerarse saludable, se desprende que la distancia entre la línea de costa media y el pie de duna es aprox. 55 m, y que el ancho y la cota de coronación de la duna primaria con aprox. 30 m y +5 m wh., respectivamente. Estos valores se usan para definir la zona de duna y el volumen de arena requerido para su regeneración en el prediseño de las alternativas.

7.3.2 Volumen a colocar en sitio y a extraer de la zona de préstamo

El volumen a colocar en sitio es la diferencia entre la topo-batimetría actual y la resultante de considerar el perfil objetivo en toda la zona de relleno de playa.

El volumen a extraer de la zona de préstamo es el volumen a colocar multiplicado por un factor de pérdidas que dependerá de la granulometría de la zona de préstamo y del método constructivo. En esta etapa el factor de pérdidas se asume 1,1 (este es un valor poco conservador, el cual se asume dada la evidencia existente de que la granulometría de la potencial zona de préstamo es similar, y algo más gruesa, a la de la playa existente).

7.3.3 Procedimiento constructivo y perfil de relleno

Asumiendo que el material será dragado y bombeado hasta la playa, el procedimiento constructivo consistirá en la construcción de una pileta de descarga del material dragado, utilizando para esto el mismo material de la playa, en donde se depositará la arena para luego ser distribuida en la playa mediante equipos de movimiento de tierra (ver Figura 71).

El perfil de relleno objetivo a fin de obra no será el perfil de diseño, ya que este último se alcanzará en un período de algunos meses por efecto de los agentes marítimos. El perfil objetivo a fin de obra estará coronado a +2,5 m Wh. y tendrá una pendiente de playa en torno a 1:15, hasta alcanzar el perfil actual (ver ejemplo en Figura 72).

El procedimiento constructivo deberá evitar que exista segregación de los sedimentos por tamaño a lo largo de la playa (i.e. evitar zonas en que se acumule el sedimento grueso y zonas en que se acumule el sedimento fino).



Figura 71 – Ejemplo de proceso constructivo de relleno de playas (tomado de <https://www.nps.gov/articles/beach-nourishment.htm>).

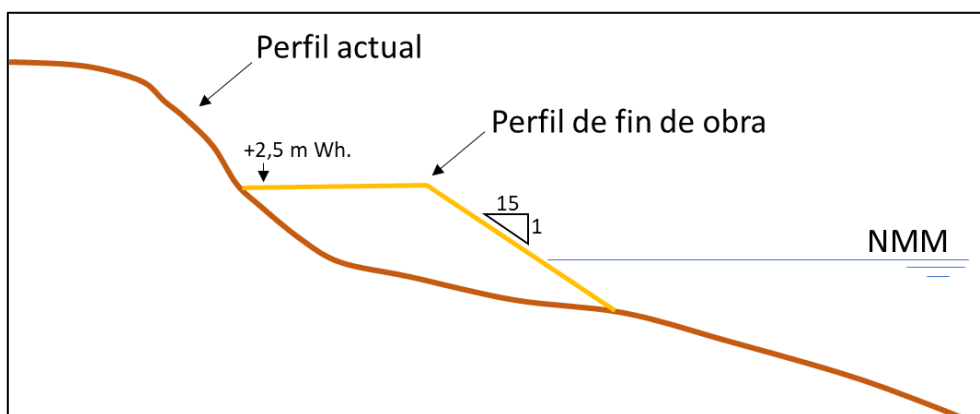


Figura 72 – Esquema del perfil objetivo a fin de obra considerando que la granulometría en la zona de préstamos es similar a la de la playa.

7.3.4 Recomendaciones para la caracterización de la zona de préstamo

Para la caracterización de las potenciales zonas de préstamo se recomienda seguir los pasos y métodos indicados en el capítulo 4 de la parte V del Coastal Engineering Manual, sección *Evaluate sediment sources*. En particular, en este manual se recomienda seguir las siguientes etapas para la caracterización de las zonas de préstamo marítimas:

(1) Estudios de gabinete

- Exploración de toda la información existente en cuanto a cartas náuticas, geológicas, literatura previa, etc. Esta tarea está parcialmente cumplida con este anteproyecto, aunque se recomienda consultar con profesionales del área de la geología, a la luz de los resultados de las muestras superficiales de sedimentos tomadas en la zona.

(2) Campaña de exploración de campo

- Incluye la realización de sísmica de reflexión en las potenciales zonas de préstamo, junto con la recolección de muestras de sedimentos superficiales y un pequeño número de cateos. Esta campaña debe cubrir una zona mayor a la ya explorada. Se incluye una propuesta tentativa de la zona a explorar (Figura 73), cuya área es aprox. 600 has.

(3) Relevamiento detallado de campo

- Campaña de cateos para caracterizar la variabilidad espacial de las zonas de préstamo que se identificaron como más prometedoras. La densidad de los cateos dependerá de los resultados de la sísmica, pero como regla general se recomienda que la distancia entre cateos sea menor a 300 m. En caso de ser necesario se podrá realizar una nueva campaña de sísmica con mayor densidad espacial. En esta etapa se realizan además los estudios complementarios orientados a identificar posibles restos arqueológicos o potenciales interferencias al dragado.

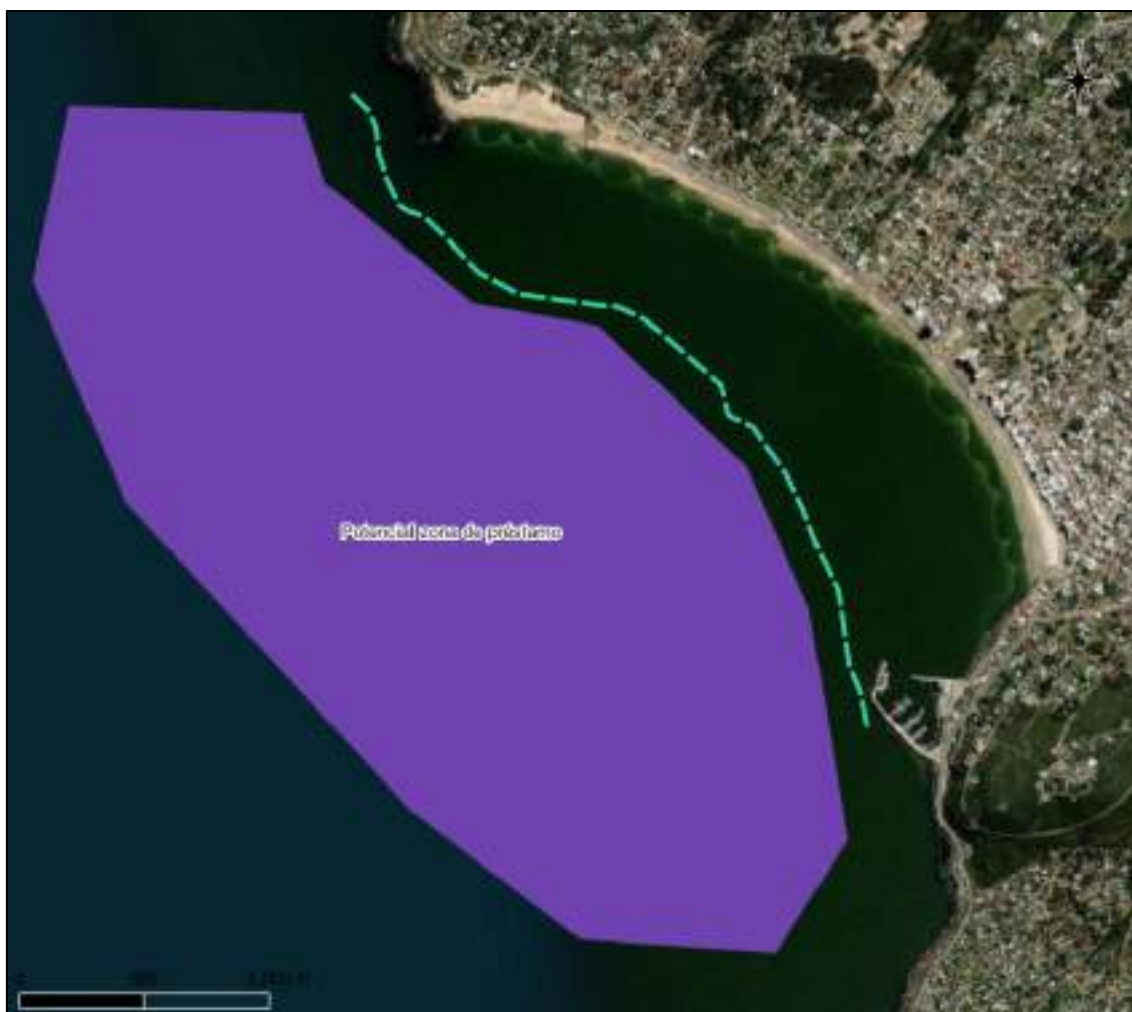


Figura 73 – Zona potencial de préstamo, a explorar, previa consulta con especialistas en geología.

7.4 Generalidades respecto al plan de monitoreo y seguimiento

Las alternativas propuestas deberán contar con un plan de monitoreo posterior a la ejecución del relleno de playa y la construcción de las obras, el cual deberá tener **como mínimo** los elementos y periodicidad que se detallan en la Tabla 7. A continuación, se comentan algunas especificaciones mínimas para cada uno de los componentes del plan de monitoreo.

Tabla 7 – Componentes y frecuencias mínimas del plan de monitoreo de la obra.

	Pre-obra	Fin de obra	Año 1	Años 2 y 3	Año 4 en adelante	Post-tormenta
Perfiles de playa	x	x	trimestral	bianual	anual	x
Granulometría de arena	x	x	anual	-	-	-
Fotografías aéreas	x	x	anual	anual	bienal	-
Oleaje y nivel de mar	x	x	x	x	-	-

7.4.1 Perfiles de playa

Se deberá realizar un levantamiento del perfil de playa desde la rambla hasta la cota -3 m Wh. Se definirán perfiles cada 100 m a lo largo de todo el arco de playa, tanto en la zona en que se realizó el relleno como en la que no.

Para el relevamiento de los perfiles se deberá tener en cuenta que:

- Todos los relevamientos correspondientes a un mismo perfil deberán realizarse e informarse considerando siempre el mismo origen de las progresivas, la misma orientación del perfil y el mismo plano de referencia. Modificaciones de cualquiera de estos elementos a lo largo del tiempo podrán hacer que el relevamiento resulte inútil.
- El levantamiento topobatimétrico de los perfiles no debe dejar tramos sin levantar. En caso de que el relevamiento deba hacerse desde mar y desde tierra deberá asegurarse que haya solape entre los dos relevamientos.

7.4.2 Granulometría de arena

Se recomienda tomar tres muestras en cada uno de los perfiles relevados: una en la berma, a pie de duna, una en el frente de playa, en la zona de ascenso y descenso de la ola, y una en el perfil sumergido, a aproximadamente 50 cm de profundidad. Para cada muestra se construirá la curva granulométrica, dejando constancia de la localización y fecha exactas de la extracción de la muestra.

7.4.3 Fotografías aéreas

Las fotografías deberán estar georeferenciadas y podrán ser obtenidas mediante vuelos de dron, siempre cubriendo la totalidad del arco de playa. Se recomienda explorar la posibilidad de realizar reconstrucción batimétrica a partir de las fotografías aéreas. En este caso, deberá prestarse particular atención a tener mantener un adecuado registro del plano de referencia respecto al cual está referida la topografía, de modo de posibilitar la comparación entre distintos relevamientos.

7.4.4 Oleaje y nivel de mar

El nivel de mar ya se mide en el puerto de Piriápolis. En caso de que estas mediciones se vean interrumpidas se deberá instalar un mareógrafo en alguno de estos puertos.

Para la medición del oleaje se recomienda el fondeo de una boya de pequeñas dimensiones con transmisión remota y que funcione mediante paneles solares (e.g. boyas GPS de Sofar o Datawell). En cualquier caso, deberá preverse al menos una campaña de mantenimiento anual para esta boya. El fondeo y las campañas de mantenimiento podrá realizarse con pequeñas embarcaciones disponibles en el puerto de Piriápolis.

7.5 Alternativa 01 – Diques exentos

7.5.1 Configuración en planta

La configuración en planta contempla un espigón de cierre al Norte del tramo, con origen en plaza Armenia, que sirva de contención del relleno, para evitar su migración sistemática hacia el noroeste. Los primeros aprox. 250 m de playa, medidos desde este espigón hacia el Este, siguen la forma en planta de equilibrio determinada por la difracción del oleaje en Punta Fría.

Los siguientes 1650 m de línea de costa siguen una forma en planta de equilibrio determinada por la ubicación de los morros de los cinco diques exentos. Los diques exentos son de 125 m de longitud, pero al ser de baja cota de coronación (coeficiente de transmisión estimado en 0,4), su longitud efectiva es de 75 m. La relación entre la longitud de los diques y la distancia a la línea de costa está en torno a 0,7, por lo que la forma en planta esperable es la saliente. La forma de las salientes se determina usando la parábola de equilibrio, y la longitud de la apertura entre diques exentos es tal que el total del tramo está en la zona de influencia de alguno de los diques exentos.

Los aprox. 600 m de línea de costa restantes (extremo sureste de la playa) siguen una forma de equilibrio controlada por la difracción en el morro del dique de abrigo del puerto de Piriápolis.

La Figura 74 presenta la forma en planta propuesta, diferenciando en los tres tramos descritos previamente, y entre el área de playa existente y el área que se prevé generar con el relleno. El área total a rellenar son 18,7 has. El área total disponible, considerando el área generada más las áreas de playa y de dunas actuales, será de 29,9 has. Esta área estará compuesta de 14,4 has de playa, de 55 m de ancho, un área para el desarrollo de duna primaria de 8,3 has, y un área disponible para otros usos de 7,2 has (otros usos posibles que se contemplan son el desarrollo de humedales interdunares para las descargas de pluviales, áreas adicionales de dunas y sistemas de control de voladuras de arena, usos deportivos, etc.). La Figura 75 resume estos resultados.

La configuración en planta de la alternativa 1 se presenta en la lámina L1, que se adjunta a este documento.

El volumen de arena del relleno de la alternativa 1 se estima en 1.100.000 m³, por lo que se requerirían extraer aprox. 1.210.000 m³ de arena de la zona de préstamo.



Figura 74 – Esquema de cómo está determinada la forma en planta en equilibrio en los distintos tramos de playa para la Alternativa 1. En amarillo la playa actual; en naranja el área a ganar con el relleno de playa; en gris las obras litorales a construir.



Figura 75 – Esquema de las áreas de playa, dunas y otros usos que se obtienen con la Alternativa 1.

7.5.2 *Secciones tipo de las obras litorales*

A continuación se presenta el prediseño estructural de las obras litorales: espigón norte y diques exentos, correspondientes a la Alternativa 1. Como ya se indicó previamente, para el diseño final (ejecutivo) de la obra se recomienda realizar ensayos de laboratorio a escala reducida para verificar la estabilidad de las obras propuestas.

Espigón de cierre Norte

Se asume que el espigón de cierre será construido previo al inicio de los rellenos, y que la batimetría al noroeste de este podría demorar en ser modificada, por lo que el mismo se diseña asumiendo la batimetría actual.

El coronamiento del espigón se establece en la cota +2.5 m Wh. desde el arranque del mismo hasta la posición de la línea de costa proyectada. A partir de allí la cota de coronación acompaña la pendiente del fondo, alcanzando la cota +1.0 m Wh. en el morro (30 m por delante de la línea de costa).

Considerando taludes 1:2 y condición de inicio de avería, las distintas condiciones de verificación (Tabla 6) y formulaciones utilizadas arrojan valores para el W50 de la coraza en el rango 3.9 ton – 6 ton.

A nivel de prediseño se opta por bloques de roca de W50 = 6 ton, en dos capas, apoyados sobre una subcapa de bloques de roca de W50 = 600 kg (ver Figura 76).

La sección tipo del espigón norte se presenta en la lámina L2, que se adjunta a este documento.

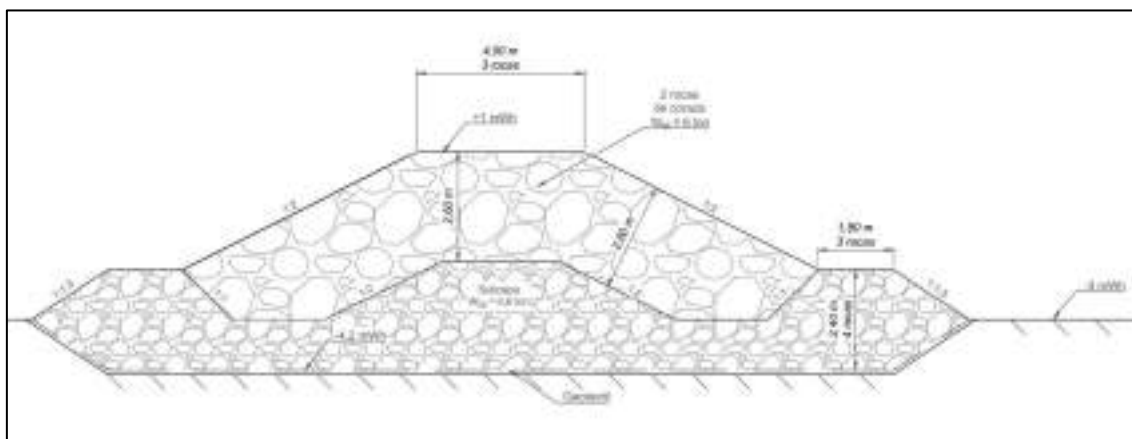


Figura 76 – Sección tipo del tramo más expuesto del espigón norte de la Alternativa 1.

Diques exentos

Se asume que los diques exentos serán construidos desde tierra, una vez avanzado el proceso de relleno de playa, y usando este material para construir obras provisionales que permitan acceder con equipos y materiales para la construir el dique. En virtud de esto, se considera que el dique estará implantado en una batimetría que se puede asumir similar a la batimetría

objetivo del relleno, lo que implica que estará sometido a condiciones de oleaje algo menores a las que resultarían de considerar la batimetría actual.

La cota de coronamiento del espigón se define a $+1.5 \text{ m Wh.}$, con el fin de no entorpecer el campo visual de los usuarios de la playa.

Considerando taludes 1:2 y condición de inicio de avería, las distintas condiciones de verificación (Tabla 6) y formulaciones utilizadas arrojan valores para el W50 de la coraza en el rango 3 ton – 7,5 ton.

A nivel de prediseño se opta por bloques de roca de $W50 = 7,5 \text{ ton}$. Dado el tamaño de los bloques no se considera viable establecer subcapas, por lo que el dique será uniforme, apoyado sobre una capa de nivelación, con diámetro a definir en el proyecto ejecutivo (ver Figura 76).

La sección tipo de los diques exentos se presenta en la lámina L2, que se adjunta a este documento.

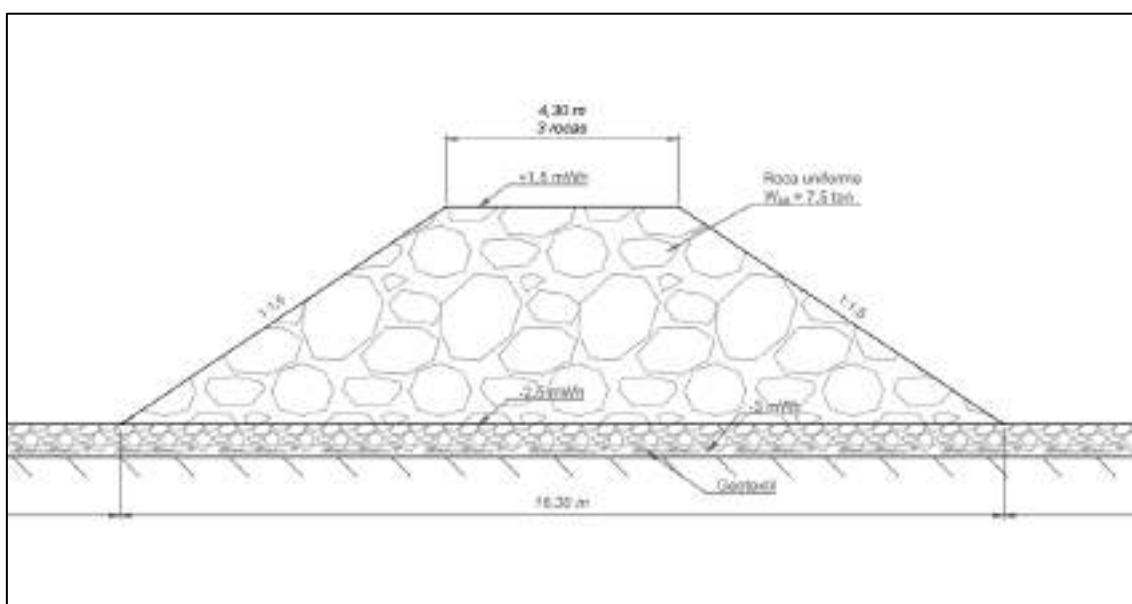


Figura 77 – Sección tipo de los diques exentos de la Alternativa 1.

7.6 Alternativa 2

7.6.1 Configuración en planta

La configuración en planta contempla un espigón de cierre al Norte del tramo, con origen en plaza Armenia, que sirva de contención del relleno, para evitar su migración sistemática hacia el noroeste. Luego, hay cuatro espigones, dos en “T” y dos “de descarga”, que contemplan la descarga de las dos principales descargas de pluviales del arco. Los cuatro tramos de playa que quedan definidos por los cinco espigones anteriores están, cada uno de ellos, soportado por el espigón de aguas abajo, y con una configuración en planta de equilibrio que está determinada por la difracción en Punta Fría y en el espigón de aguas arriba.

El tramo de playa ubicado al sureste del espigón “de descarga” 2 está apoyado en este último y tiene una posición de equilibrio controlada por la difracción del oleaje en el morro del dique de abrigo del puerto de Piriápolis.

La Figura 78 presenta la forma en planta propuesta, diferenciando en los tres tramos descritos previamente, y entre el área de playa existente y el área que se prevé generar con el relleno. El área total a rellenar son 15,7 has.

El área total disponible, considerando el área generada más las áreas de playa y de dunas actuales, será de 26,9 has. Esta área estará compuesta de 14,5 has de playa, de 55 m de ancho, un área para el desarrollo de duna primaria de 7,6 has, y un área disponible para otros usos de 4,8 has (otros usos posibles que se contemplan son el desarrollo de humedales interdunares para las descargas de pluviales, áreas adicionales de dunas y sistemas de control de voladuras de arena, usos deportivos, etc.). La Figura 79 resume estos resultados.

A diferencia de la Alternativa 1, la Alternativa 2 prevé canales de descarga de las pluviales en la parte central de los espigones “de descarga”, sin desmedro de que también se prevé la posibilidad de generar humedales interdunares por detrás de la duna primaria.

La configuración en planta de la Alternativa 2 se presenta en la lámina L2, que se adjunta a este documento.

El volumen de arena del relleno de la Alternativa 2 se estima en 880.000 m³, por lo que se requerirían extraer aprox. 970.000 m³ de arena de la zona de préstamo.



Figura 78 – Esquema de cómo está determinada la forma en planta en equilibrio en los distintos tramos de playa para la Alternativa 2. En amarillo la playa actual; en naranja el área a ganar con el relleno de playa; en gris las obras litorales a construir.



Figura 79 – Esquema de las áreas de playa, dunas y otros usos que se obtienen con la Alternativa 2.

7.6.2 Secciones tipo de las obras litorales

A continuación se presenta el prediseño estructural de las obras litorales: espigón norte, espigones en “T” y espigones “de descarga”, correspondientes a la Alternativa 2. Como ya se indicó previamente, para el diseño final (ejecutivo) de la obra se recomienda realizar ensayos de laboratorio a escala reducida para verificar la estabilidad de las obras propuestas.

Espigón de cierre Norte

Se asume que el espigón de cierre será construido previo al inicio de los rellenos, y que la batimetría al noroeste de este podría demorar en ser modificada, por lo que el mismo se diseña asumiendo la batimetría actual.

El coronamiento del espigón se establece en la cota +2.5 m Wh. desde el arranque del mismo hasta la posición de la línea de costa proyectada. A partir de allí la cota de coronación acompaña la pendiente del fondo, alcanzando la cota +1.0 m Wh. en el morro (30 m por delante de la línea de costa).

Considerando taludes 1:2 y condición de inicio de avería, las distintas condiciones de verificación (Tabla 6) y formulaciones utilizadas arrojan valores para el W50 de la coraza en el rango 4 ton – 6 ton.

A nivel de prediseño se opta por bloques de roca de W50 = 6 ton, en dos capas. Dado el tamaño de los bloques en relación a la altura total del dique no se considera viable establecer subcapas, por lo que el dique será uniforme, apoyado sobre un geotextil y con dos pie de apoyo de W50 = 600 kg (ver Figura 80).

La sección tipo del espigón norte se presenta en la lámina L4, que se adjunta a este documento.

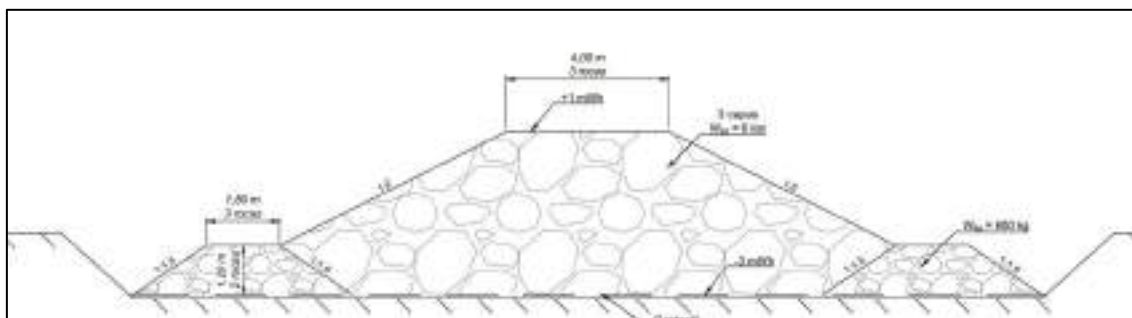


Figura 80 – Sección tipo del tramo más expuesto del espigón norte de la Alternativa 2.

Espigones en “T” y de “descarga”

Se asume que los espigones en “T” y los de “descarga” se irán construyendo en la medida que se logran avances significativos con el relleno de playa. En virtud de esto, se considera que estos estarán implantados en una batimetría que se puede asumir similar a la batimetría objetivo del relleno, lo que implica que estarán sometidos a condiciones de oleaje algo menores a las que resultarían de considerar la batimetría actual.

La cota de coronamiento de los espigones se asume +2 m Wh., uniforme, a fin de minimizar el bloqueo del tránsito peatonal en la playa. Para cotas de playa superiores a la +2 m Wh. y hasta el pie de duna, podrá ser conveniente implementar bloqueos temporales al flujo de arena, como espigones de madera y/o cercas captoras. Esto deberá ser evaluado en el proyecto ejecutivo y, llegado el caso, testeado en campo.

Considerando taludes 1:2 y condición de inicio de avería, las distintas condiciones de verificación (Tabla 6) y formulaciones utilizadas arrojan valores para el W50 de la coraza en el rango 2 ton – 5 ton.

A nivel de prediseño se opta por bloques de roca de W50 = 4,5 ton. Dado el tamaño de los bloques en relación con la altura total de la obra no se considera viable establecer subcapas, por lo que el espigón será uniforme, apoyado sobre una capa de nivelación, con W50 = 450 kg (ver Figura 76).

Las secciones tipo de los espigones de la Alternativa 2 se presentan en la lámina L4, que se adjunta a este documento.

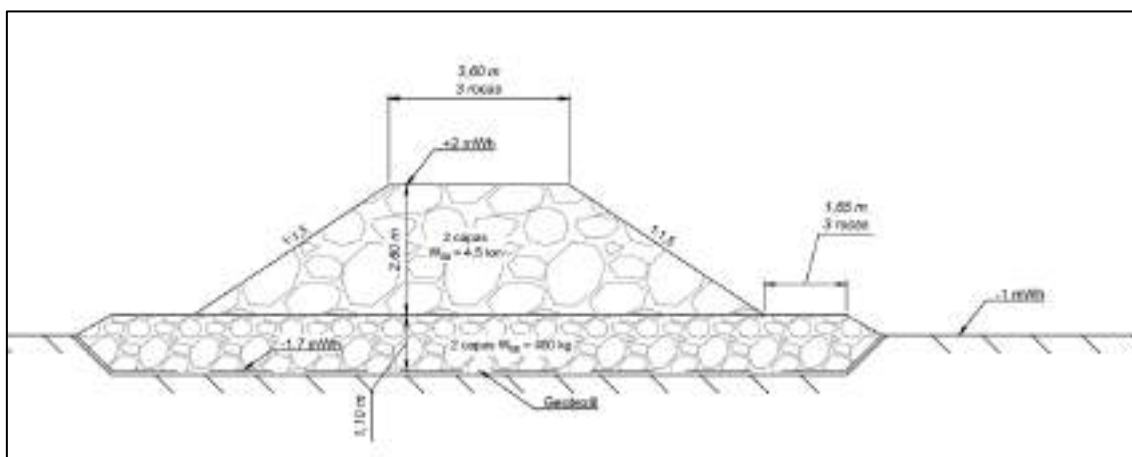


Figura 81 – Sección tipo de los espigones en “T” y de “descarga” de la Alternativa 2.

7.7 Comparativa de alternativas

La Tabla 8 presenta una comparativa de las áreas actuales y proyectadas, diferenciando entre playa, dunas y otros usos no asignados en el proyecto, así como el área de relleno propuesta. Se observa que la Alternativa 2 es menos generosa que la Alternativa 1 en término de las áreas generadas, sacrificándose principalmente áreas de uso no asignado (las áreas de playa son iguales a efectos prácticos, y hay poca diferencia en las áreas de dunas). La Tabla 9 presenta los volúmenes totales de arena y roca requeridos para implementar las dos alternativas propuestas, lo que puede servir de base para el costeo de las mismas.

Si se considera pertinente sería posible ajustar la Alternativa 1 para tener un área de relleno similar a la de la Alternativa 2. Esto implicaría una reducción del costo del relleno de la Alternativa 1, pero tendría muy poco impacto en el volumen total de roca y en los costos asociados a la construcción de obras litorales.

Tabla 8 – Comparativa de las áreas disponibles en la actualidad, con las de las alternativas propuestas

	Área playa	Área dunas	No asignado	Total	Relleno
Actual	10.9 has	0.3 has	---	11.2 has	---
Opción 1	14.4 has	8.3 has	7.2 has	29.9 has	18.7 has
Opción 2	14.5 has	7.6 has	4.8 has	26.9 has	15.7 has

Tabla 9 – Comparativa de los volúmenes de arena y roca necesarios para cada alternativa

	Volumen de arena necesario (en sitio)	Volumen de roca necesario	W50 máximo requerido
Alternativa 1	1.100.000 m ³	43.000 m ³	7.5 ton
Alternativa 2	880.000 m ³	30.000 m ³	6 ton

7.8 Consideraciones finales

Mediciones de oleaje y otras variables climáticas

No se cuenta con mediciones de oleaje en sitio que permitan calibrar los modelos numéricos utilizados. El oleaje es el principal forzante que determina dos aspectos fundamentales del diagnóstico y de las alternativas propuestas, a saber: la estimación del transporte litoral y la estimación de los tamaños de coraza de los diques y espigones propuestos.

En este sentido, se entiende que previo a la realización del proyecto ejecutivo es recomendable contar con al menos un año de datos de oleaje medidos en sitio, así como realizar la correspondiente calibración y validación del modelo de oleaje, a fin de tener mayor certeza en el diseño final de las alternativas.

Se recomienda medir de forma concomitante corrientes y viento en el sitio. Si bien esta información no es fundamental para el diseño de la obra, la información será de utilidad para la planificación de la obra, en particular para evaluar la operatividad de los dragados y rellenos.

Se recomienda mantener los equipos de medición de variables climáticas en sitio durante los períodos de construcción y seguimiento intensivo de la obra.

Reconstrucción de dunas

El relleno de arena propuesto para las distintas alternativas prevé un volumen de arena (mínimo) para alimentar la construcción de una duna primaria. Esta reconstrucción deberá ir acompañada de medidas tendientes al fortalecimiento de la duna y su ecosistema:

- cercas captoras que promuevan el crecimiento de la duna y prevengan la voladura de arena a la rambla,
- plantación de vegetación dunar,
- sistema de pasarelas y barreras para que el tránsito peatonal no mine los esfuerzos orientados al fortalecimiento y reconstrucción de dunas.

Descargas de pluviales y humedales interdunares

Las alternativas propuestas prevén la generación de espacio tal que sea posible generar humedales interdunares para recibir la descarga de las pluviales que hoy llegan a la playa. Los objetivos de estos humedales sería: evitar la situación de humedad de playa que se da de forma más o menos continua en algunas descargas, facilitando la filtración del flujo base en el humedal, y la mejora de la calidad del agua que finalmente llega al mar.

Estos humedales deberán ser diseñados considerando aspectos hidráulicos y ecológicos en la fase de proyecto ejecutivo.

Cronograma tentativo del proyecto

La Figura 82 presenta un cronograma tentativo de las actividades que se deberán realizar previa y posteriormente a la ejecución de la obra, incluyendo los estudios previos necesarios para poder realizar el proyecto ejecutivo, el proyecto ejecutivo y el estudio de impacto ambiental y el seguimiento del desempeño de la obra una vez finalizada.

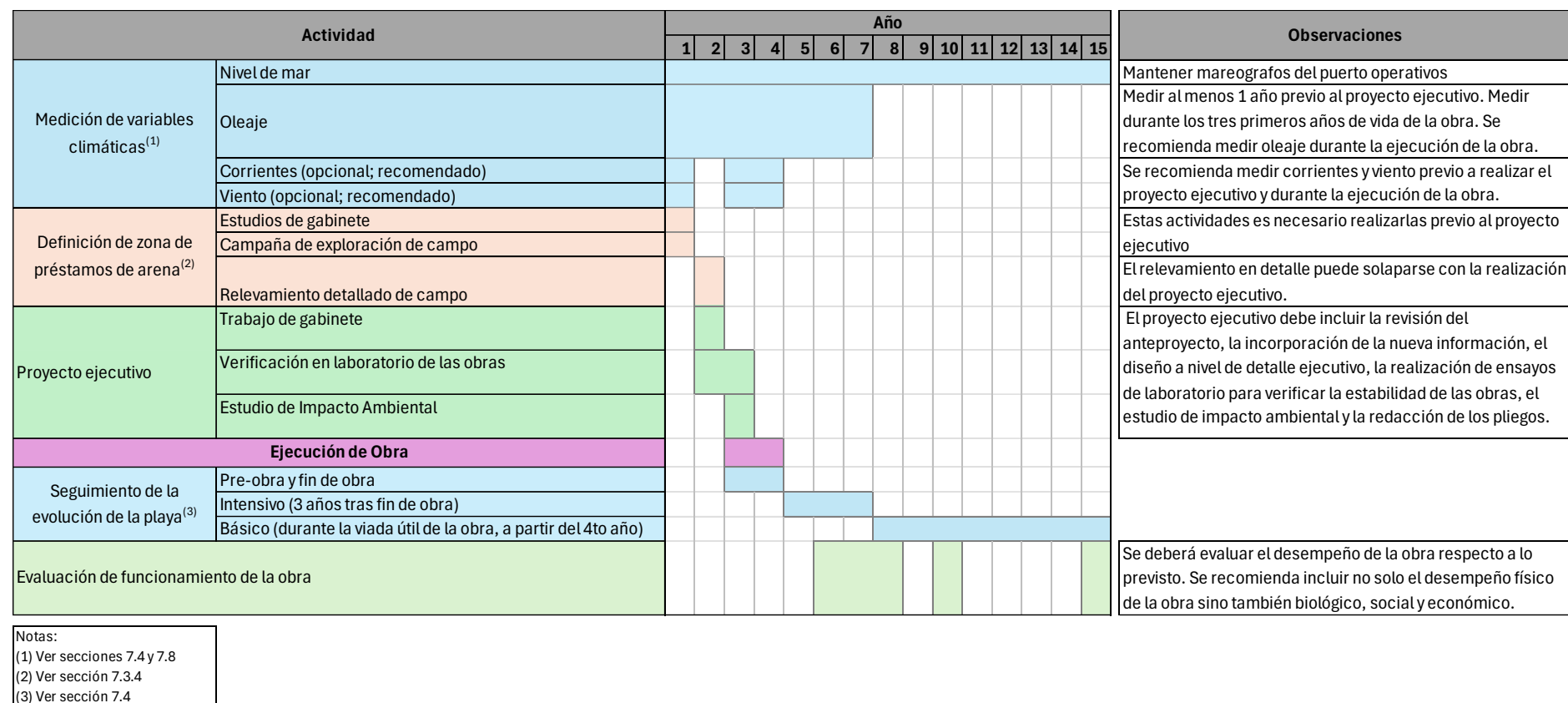


Figura 82 – Cronograma tentativo del proyecto, desde los estudios previos necesarios para realizar el proyecto ejecutivo hasta el seguimiento posterior al fin de obra.

Anexo 1 – Información Topo-Batimétrica proporcionada por la Intendencia de Maldonado

La información topo-batimétrica proporcionada por la Intendencia de Maldonado consta de información de topografía en 60 perfiles de playa emergida en toda la extensión del arco de playa, cuya distribución se muestra en la Figura 83, y de información batimétrica de toda la extensión de la playa, hasta profundidades de 15 m a una distancia de 3,5 km de la costa aproximadamente, la cual se muestran en la Figura 84.

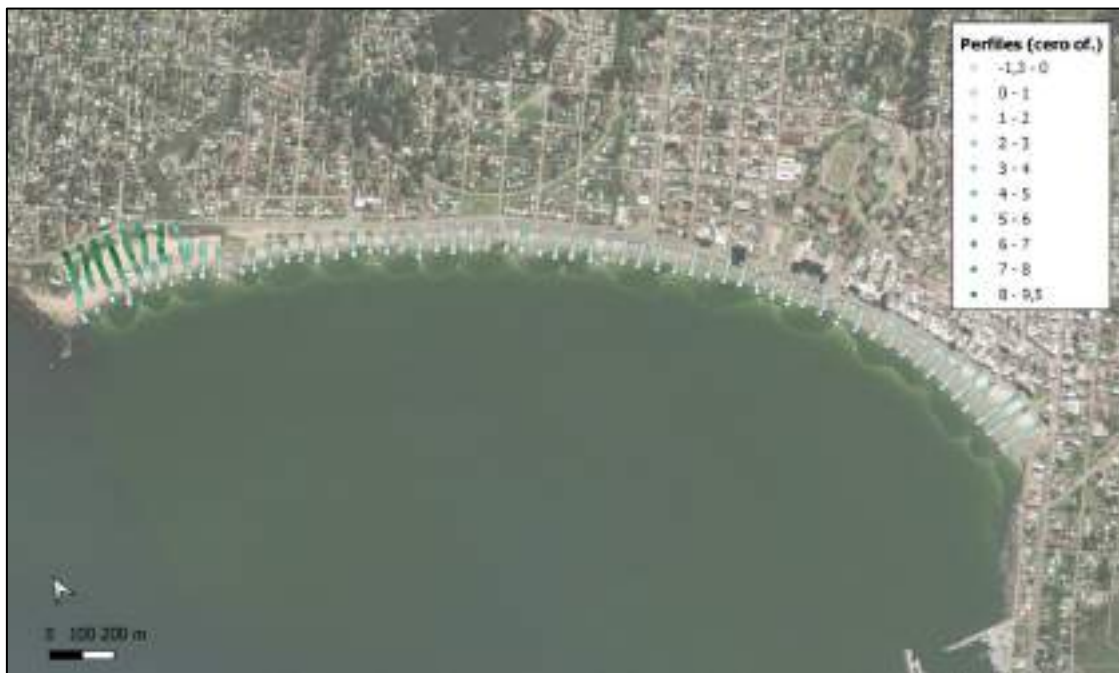


Figura 83 – Perfiles de playa relevados por la Intendencia de Maldonado.

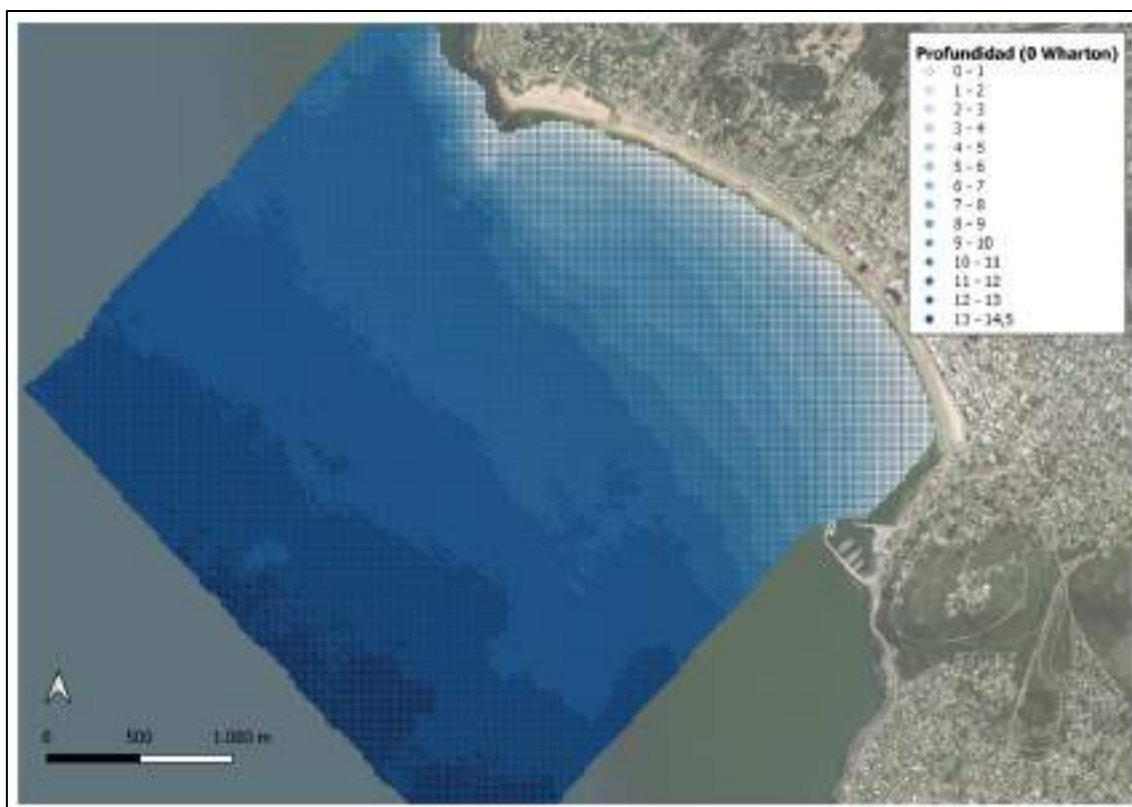


Figura 84 – Batimetría de la playa Piriápolis.