

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS

SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS

SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



PROVINCIA DEL CHUBUT

## DEFENSA COSTERA EN PLAYA MAGAÑA

PARTE 2 - DEFINICION DE LAS OBRAS

Informe LHA -268- 02-07

Diciembre, 2007

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PROVINCIA DEL CHUBUT

## DEFENSA COSTERA EN PLAYA MAGAÑA

### PARTE 2 – DEFINICION DE LAS OBRAS

**RESUMEN:** Se presenta una evaluación de las condiciones físicas del entorno costero desde el punto de vista de las causas de erosión hídrica. Se delimitan tramos costeros con diversa vulnerabilidad a los procesos erosivos y se evalúan y predimensionan obras de control .

**PALABRAS CLAVE:**

defensa de costas – protección de costas – transporte litoral – playa Magagna – Provincia del Chubut

Informe	LHA 268-02-07
Fecha	Diciembre, 2007
PROYECTO	651
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección General de Infraestructura

**Director del Laboratorio de Hidráulica**

Ing. Julio De Lio

**Jefe del Programa de Hidráulica Marítima**

Ing. R. D. Castellano

---

**Informe Producido por**

Ing. Nicolás Tomazin

Ing. Raúl Cáceres

**EQUIPO DE TRABAJO**

Téc. Mec. Carlos Haspert

M.M.O. Sebastián Peralta

## INDICE DE MATERIAS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETIVOS Y METODOLOGIA .....	3
3	DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO .....	5
	3.1 Geomorfología.....	6
	3.2 Clima .....	8
	3.3 Planimetría.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
	3.4 Régimen de vientos, olas y mareas.....	10
	3.4.1 Vientos.....	10
	3.4.2 Mareas .....	11
	3.4.3 Olas.....	12
4	RELEVAMIENTO DE LA COSTA Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO EROSIVO.....	15
5	EVOLUCIÓN HISTORICA DE LA LÍNEA DE LA COSTA.....	21
6	RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA POR ACCIÓN DE TEMPORALES ....	28
	6.1 Método de convolución para estimar la erosión por temporales.....	28
	6.2 Aplicación del Método .....	33
	6.2.1 Erosión para niveles extraordinarios de marea.....	34
	6.2.2 Erosión para niveles ordinarios de marea.....	36
	6.2.3 Modificación del perfil por relleno de playa .....	38
7	TRANSPORTE SÓLIDO LONGITUDINAL .....	39
	7.1 Método de cálculo del transporte sólido longitudinal (QL) .....	40
	7.2 Aplicación en Playa Magagna .....	42
	7.3 Resultados.....	43
8	DIAGNÓSTICO DE SITUACION Y ZONIFICACION.....	48
9	LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA ESTABILIZACION DE LA COSTA	
	52	
	9.1 Planteo de obras de defensa.....	52
	9.2 Aspectos generales de proyecto.....	58
	9.3 Parámetros hidráulicos de proyecto.....	61
10	PREDIMENSIONADO.....	66
	10.1 Muro longitudinal de gaviones .....	66
	10.1.1 Cálculo de sobrepaso .....	66

10.1.2 Resultados: .....	68
10.2 Relleno de playa contenido por espigones .....	71
10.2.1 Generación de la playa de grava.....	72
10.2.2 Geometría del espigón.....	77
10.2.3 Diseño estructural del espigón.....	79
10.2.4 Cálculo del tamaño y peso del bloque .....	80

PROVINCIA DEL CHUBUT

## DEFENSA COSTERA EN PLAYA MAGAGNA

Parte 2 – Definición de las Obras

Diciembre, 2007

### 1 INTRODUCCIÓN

Playa Magagna constituye un tramo costero ubicado sobre la costa Atlántica de la provincia del Chubut. Al igual que en otras franjas del litoral patagónico, la costa presenta características erosivas debido fundamentalmente a factores hídricos, entre los que la acción de las olas, las mareas y la precipitación pluvial constituyen las causas básicas.

En los últimos años se ha producido un importante desarrollo urbano de la zona que se encuentra evidenciado por la instalación de numerosas viviendas y obras de infraestructura, dando lugar a la ocupación de un amplio sector de la franja costera.

La conjunción de estos factores, es decir el incremento de la presión urbana en un área donde los procesos erosivos han tenido históricamente un carácter sostenido, convierten a esta franja costera en un área de riesgo<sup>1</sup>, lo que lleva a plantear la necesidad de evaluar las causas de los procesos erosivos y en función de ello definir obras de mitigación.

---

<sup>1</sup> *Evaluación Geoambiental Preliminar de Riesgo Costero en Playa Magagna*, Chubut. Monti, Alejandro J.A.. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. N° 13, 1999.

Con este propósito se ha planteado en primera instancia la realización de los estudios pertinentes que permitan identificar causas y evaluar el problema, para a continuación formular soluciones adecuadas y planificar obras de defensa costera apropiadas para preservar el frente urbano en distintos sectores de costa ubicados a lo largo de esta región.

En este contexto se desarrollaron los estudios que aquí se presentan y que fueron realizados mediante la formalización del Acta Complementaria N° 5 al Convenio Marco de Cooperación e Investigación suscripto en Agosto de 2002 entre el INA y la Provincia del Chubut.

Como parte de ello, y en el mismo marco contractual, se ha ejecutado previamente la Parte 1 de este estudio, en el que se abordó la caracterización del clima de olas en la franja costera en cuestión. (Informe LH 268-01-07).

## 2 OBJETIVOS Y METODOLOGIA

Las tareas realizadas tuvieron el propósito en primer lugar, de formular un diagnóstico de situación referente a las causas que originan la degradación de la costa en el área de Playa Magaña, próxima a la ciudad de Rawson.

Sobre la base de la caracterización de los procesos físicos dominantes en el área se propusieron y predimensionaron obras de protección costeras para el control de los mismos.

Dada la extensión de la costa en cuestión (unos 6 Km), se puso especial atención en evaluar las características y la intensidad de los procesos físicos a lo largo la misma, de modo de que las obras propuestas respondieran a criterios de zonificación de la playa en función de ello.

Se formularon las soluciones más convenientes para cada sector de la costa, contemplando la posibilidad de proyectar distintos tipos de obra adaptados a las condiciones geográficas, hidrográficas y geológicas por tramos o sectores.

Por otra parte se evaluó la vulnerabilidad de los distintos sectores costeros en función del uso actual de la tierra. El proyecto intenta incorporar el futuro incremento en el desarrollo de actividad humana en la región como parte del aprovechamiento de la costa, ya sea desde el punto de vista del desarrollo urbano, recreacional, o el de posibles emprendimientos económicos.

Habida cuenta de la extensión de la costa en cuestión, la formulación de un proyecto integral para la protección de la línea costera debió considerar la posibilidad de establecer un orden de prioridades para la realización de las obras en forma secuencial, sobre la base de criterios que involucren tanto el grado de exposición, vulnerabilidad y deterioro de cada sector como el del uso actual y futuro de los terrenos que se prevé proteger.

La metodología desarrollada se basó en la realización de las etapas que se indican más abajo. Dado que la acción del oleaje es un importante agente de degradación de la costa, una tarea central de la metodología que se presenta ha sido la caracterización del clima de olas en el área costera.

1. Búsqueda, organización, análisis e interpretación de datos de base de la costa marítima de la provincia en la región costera en cuestión: aspectos geológicos, hidrográficos, meteorológicos, cartografía, imágenes satelitales, características de materiales sedimentarios, etc. Estudios y antecedentes en la región.
2. La implementación de un modelo matemático de propagación de olas desde puntos en aguas profundas donde se disponga de información hasta una posición costera representativa del frente de playa afectado.
3. Caracterización del clima de olas en el área costera. Caracterización de las olas frecuentes y olas extremas. Identificación de olas generadas localmente y de olas oceánicas (swell). Determinación de rosas de olas para ubicaciones características del frente costero.
4. Evaluación de niveles extremos del mar por efecto meteorológico y calentamiento global.
5. Análisis del transporte de sedimentos: identificación de las modalidades de transporte dominantes. Sectorización del frente costero según su vulnerabilidad y/o características de los procesos erosivos dominantes.
6. Análisis de tipos de obra por sectores y su factibilidad técnico económica (incluyendo aspectos ambientales básicos).
7. Dimensionado de las obras de defensa.

En el desarrollo de las actividades mencionadas en la metodología propuesta se destaca el trabajo conjunto realizado con la DGIP, la cual brindó su apoyo tanto en las tareas de búsqueda de información y antecedentes, y relevamientos de campo, como así también en el análisis de resultados y la propuesta y selección de alternativas.

### 3 DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

Playa Magagna ocupa una franja litoral de aproximadamente 6 Km a partir de la margen septentrional de la desembocadura del Río Chubut (**Figura 3.1**). Integran el complejo Playa Magagna tres segmentos costeros denominados localmente, de norte a sur: Playa Bonita, Playa El Faro y Playa Cangrejales.



En términos generales la franja costera en la que se localiza Playa Magagna se compone de barrancas y acantilados compuestos de materiales poco cohesivos. Su desarrollo vertical puede alcanzar hasta los 50 m, aunque en términos generales son del orden de 10 a 20 m.

Una plataforma rocosa cuasi horizontal, de origen sedimentario (restinga) de ancho variable del orden de 200 m, se desarrolla prácticamente sobre todo el frente costero y resulta cubierta por el mar en marea alta.

La evolución del paisaje<sup>1</sup> actual en el sector costero es el resultado de su origen geológico, por una parte, de la acción combinada de la dinámica marina (a través de la acción de olas, las corrientes costeras y mareas) y del escurrimiento superficial generado a partir de las infrecuentes pero muy intensas lluvias. La erosión hídrica inducida por este conjunto de factores es causa de un continuo cambio del relieve costero, convirtiendo a esta franja costera en una zona de riesgo, vulnerable a los factores naturales indicados.

### 3.1 Geomorfología

En el área de estudio coexisten diversas formaciones geológicas. En los tramos inferiores y medio de los acantilados asoman afloramientos rocosos de edad terciaria correspondientes a la formación Gaiman<sup>2</sup>. Dichos afloramientos están constituidos por tobas, limonitas y arcillitas con notoria fracturación y consistencia media a friable (**Figuras 3.2**).

En todo el tramo de costa de Playa Magagna, tal como ocurre en gran parte del litoral patagónico, la extensa restinga de escasa pendiente juega un rol preponderante en las características de los procesos costeros. Su posición altimétrica es tal que sólo durante la marea alta resulta cubierta por el agua, permitiendo la llegada de las olas a la playa. La restinga actúa como un filtro natural del oleaje, disipando por rotura y fricción del fondo la energía de las olas más altas y limitando el tiempo durante el cual la acción marina actúa sobre la costa.

---

<sup>2</sup> Haller, M. y Mendía, J. (1980). *Las sedimentitas del ciclo patagónico en el litoral atlántico nordpatagónico*.



**Figuras 3.2: Vistas de las diversas formaciones geológicas en Playa Magagna**

La fuerte persistencia de olas oceánicas desde la dirección SSE, de amplitud moderada (1 a 2 m) y períodos del orden de los 12 segundos, en combinación con la abundante presencia de gravas y canto rodado, son causa de la existencia de la acumulación de materiales gruesos bajo la forma de cordones litorales de gran desarrollo y fuerte pendiente en algunos tramos del frente costero, particularmente por encima del nivel medio del mar.

El ancho de la acumulación varía desde valores de 130 m en Playa Bonita y 240 m en la parte norte de Playa Cangrejales hasta valores mínimos de 20 m en el extremo sur de esta última playa (**Figura 3.3**).



**Figuras 3.3: Playa Bonita y sector norte de playa Cangrejales**

Estas acumulaciones de sedimento que configuran las diversas ~~formas~~ características morfológicas de la costa, son evidencia de la existencia de una dinámica litoral intensa y actúan como una protección natural del pie de las barrancas o acantilados, resultando por esta razón inactivos. Por el contrario, el acantilado activo coincide con tramos de la costa donde no se presentan los cordones litorales indicados.

Por debajo del nivel medio, las playas se conforman de gravas finas y arenas, presentando pendientes más suaves.

## 3.2 Clima

El clima en la región es de tipo árido, templado – frío, ventoso. Las precipitaciones que afectan a la región no son frecuentes pero sí son muy intensas. El promedio pluviométrico oscila entre los 175 a 196mm anuales.

En los últimos 10 años se han registrado casi anualmente, como mínimo, un evento pluvial extraordinario. A modo de ejemplo se presentan eventos pluviales ocurridos en la región<sup>3</sup>:

**Tabla 3.1**

<b>Fecha</b>	<b>Duración</b>	<b>Precipitación</b>
<i>Mayo de 1992</i>	en 2 días	130mm
<i>Octubre de 1996</i>	en 1 día	34mm
<i>Abril de 1998</i>	en 6 días	239mm
<i>Mayo de 2003</i>	en 2 días	40mm
<i>Julio de 2006</i>	en 1 día	37mm
<i>Febrero de 2007</i>	en 1 día	32mm

La periodicidad de las precipitaciones extraordinarias ha tenido una incidencia directa en la evolución del relieve por erosión hídrica.

---

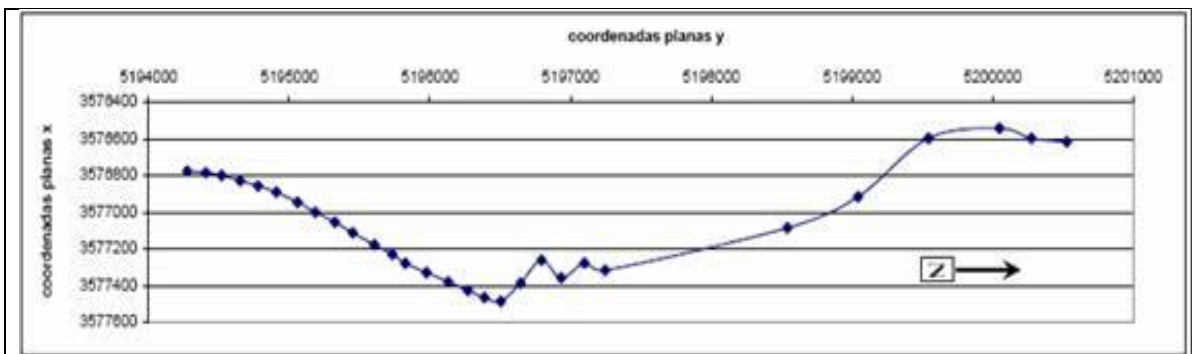
<sup>3</sup> Área física ambiental – Centro Nacional Patagónico  
Estación meteorológica INTA – Trelew.

### 3.3 Topografía y Batimetría

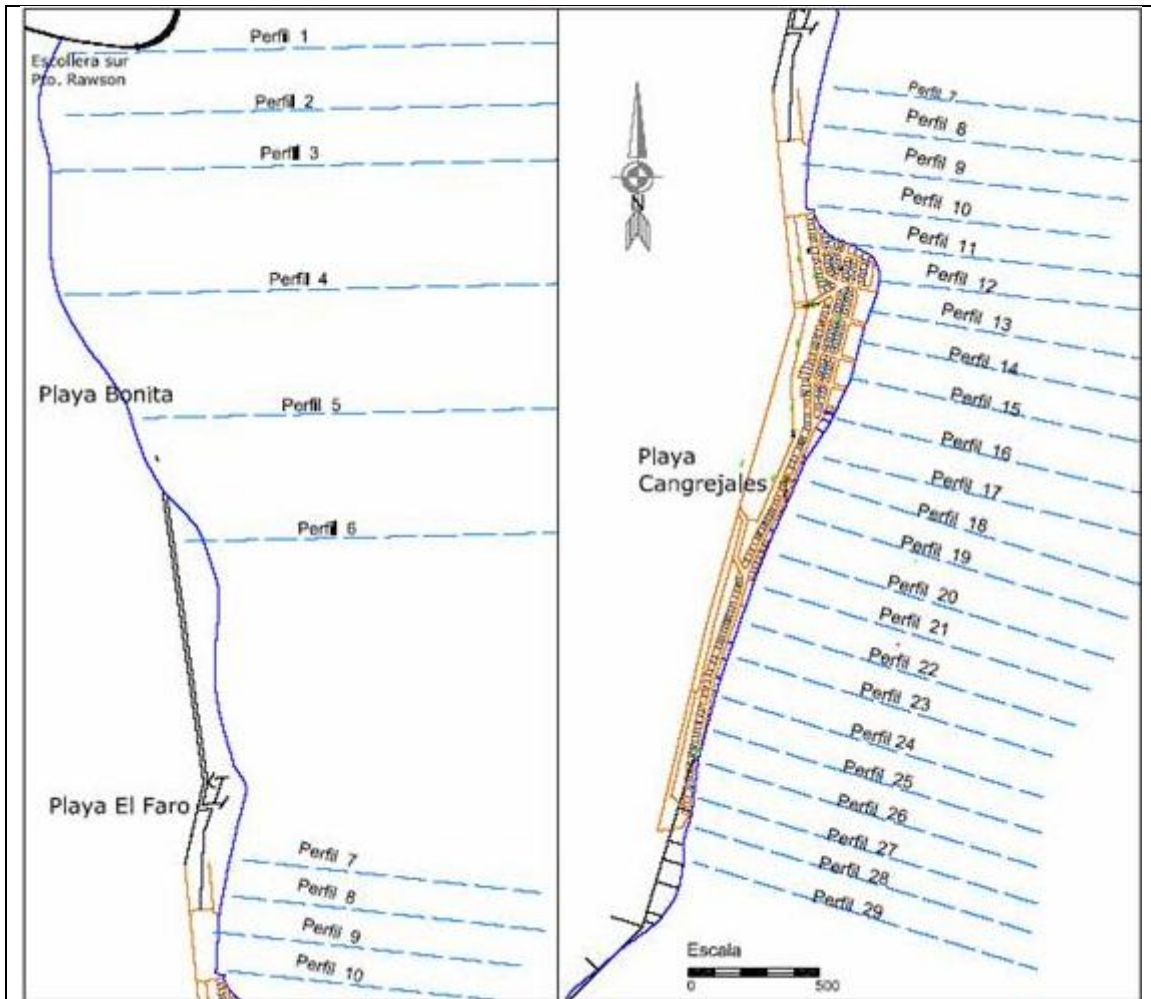
La DGIP proveyó de un relevamiento realizado entre abril y julio de 2006 a fin de obtener las características actuales que presenta la zona, en cuanto a niveles y configuración topográfica y batimétrica.

La información topográfica fue determinada a partir del trazado de una poligonal de apoyo del orden de 6 Km de longitud (**Figura 3.4**) y la realización de 29 perfiles aproximadamente perpendiculares a la traza de dicha poligonal que comienzan junto al la escollera sur del puerto de Rawson y se extienden hasta el extremo sur de playa Cangrejales (**Figura 3.5**).

En los planos 1 a 5, adjunto en el **Anexo I** se muestran los perfiles N° 1 a N° 29 correspondientes a la zona en estudio.



**Figura 3.4: Poligonal de apoyo - Coordenadas planas GAUSS KRUGER - WGS84**



**Figura 3.5: Perfiles relevados**

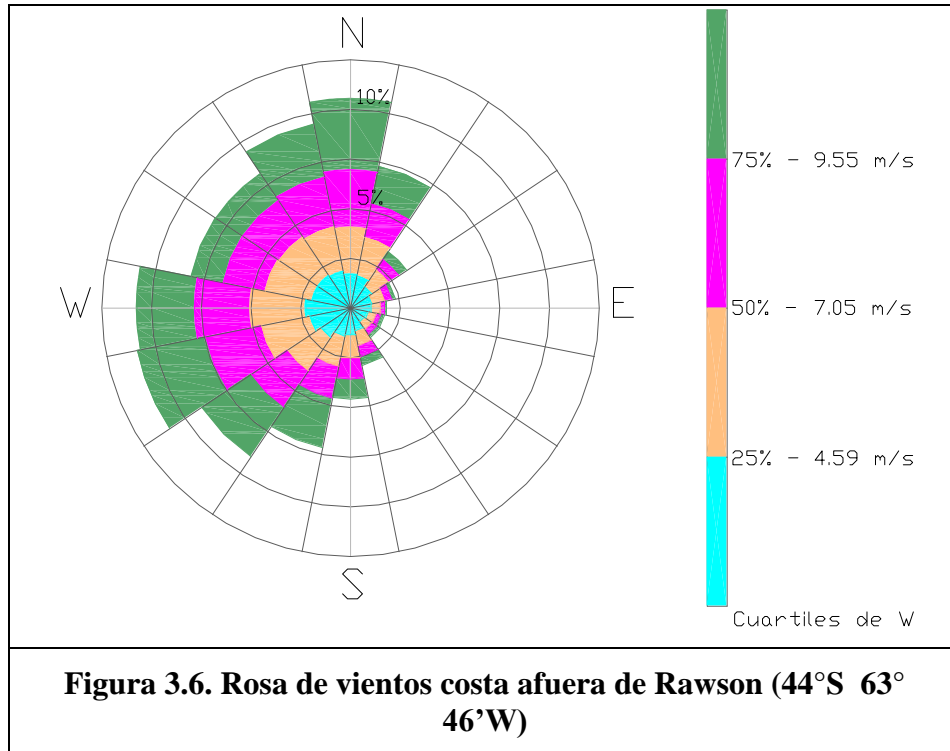
### 3.4 Régimen de vientos, olas y mareas

El régimen de vientos, clima de olas y características de la marea astronómica han sido descritos en detalle en el Informe LH 268-01-07. Se presenta aquí una síntesis de esos resultados.

#### 3.4.1 Vientos

En la **Figura 3.6** se presenta la rosa de vientos determinada a partir de valores costa afuera, en la ubicación  $44^{\circ}$  S  $63^{\circ}$  46' W. Se nota claramente la preponderancia de los

vientos intensos del sector W y SW, aunque esto no es relevante desde el punto de vista de la generación de oleaje que incide sobre la costa.



### 3.4.2 Mareas

El nivel del mar debe su variación en el corto plazo esencialmente a tres causas: los efectos gravitacionales principalmente de la Luna y el Sol, los efectos atmosféricos (vientos, presión atmosférica), los efectos geostroáficos sobre las corrientes costeras. Una cuarta causa, el cambio climático global, induce cambios lentos pero sistemáticos en el largo plazo.

En la Parte 1 - Clima de Olas (informe LHA 268-01-07) se presenta un análisis detallado de estas variables. Los valores adoptados para este proyecto, referidos al plano de reducción MOP son:

NMM: +1.12 m

Marea astronómica máxima: +3.59 m

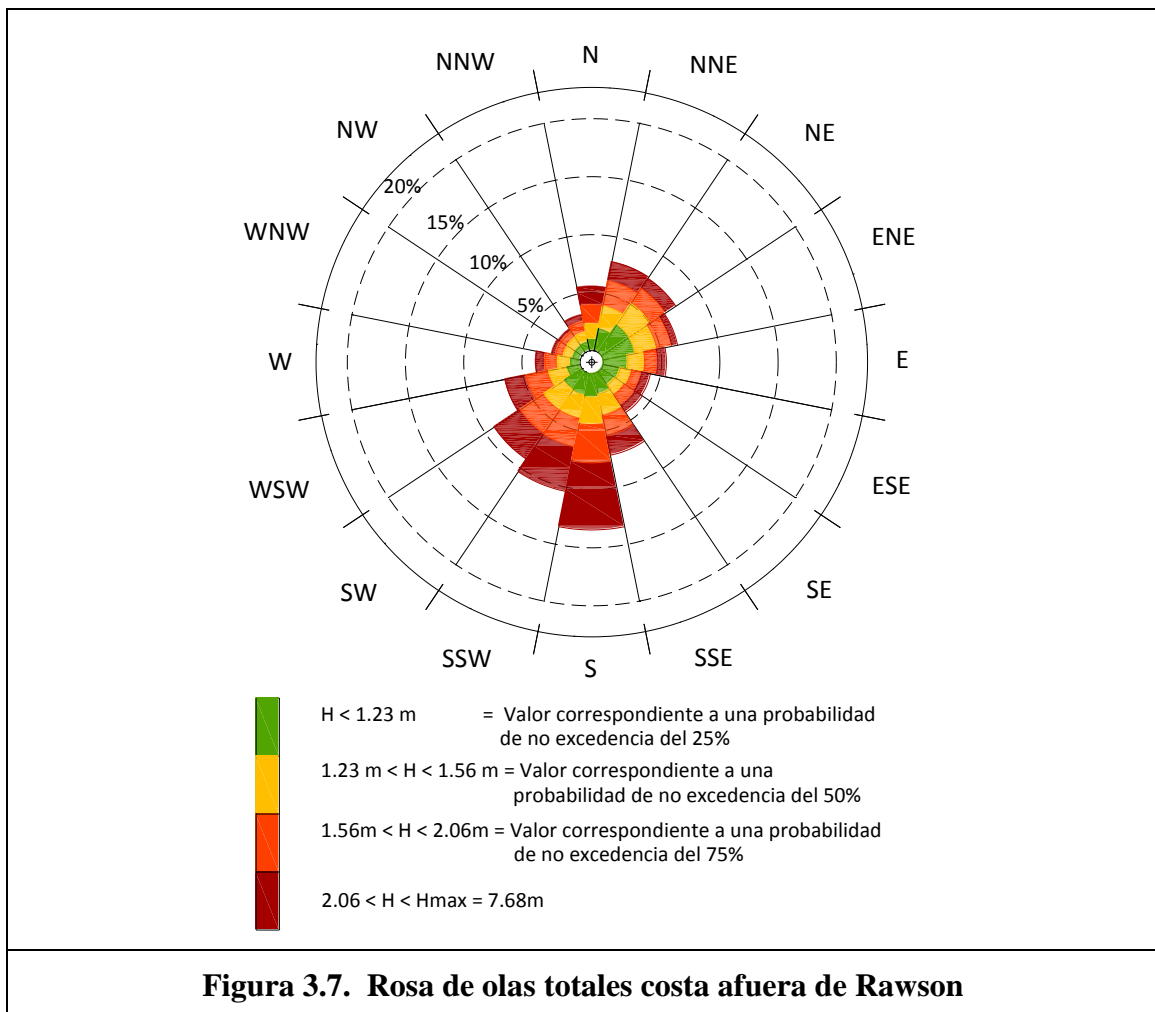
Marea meteorológica: +1.00 m (período de retorno 50 años)

Sobreelevación por calentamiento global (25 años, 2 mm/año): +0.05m

Nivel máximo: +4.64 m MOP

### 3.4.3 Olas

Se dispuso de una serie cronológica de algo más de 10 años (1995-2005) como resultado de la aplicación de un Modelo Global de Olas, en la posición 44°S, 63° 46'W y mediante modelación matemática se caracterizó el clima de olas frente a la línea costera de Playa Magagna. Este tema fue desarrollado detalladamente en la primera parte de este informe. Aquí, a modo ilustrativo, se presenta la **Figura 3.7** que constituye un resumen gráfico de una parte importante del análisis del clima de olas.



En las **Tablas 3.2 y 3.3** se resumen del resultado de análisis de valores extremos (los procedimientos de cálculo se han detallado en la Parte 1) para dos puntos ubicados en la costa de Playa Magagna sobre la curva batimétrica –10 m (cota MOP).

Olas locales (generadas localmente por viento)

Resultado Gumbel		
Tr	F(x)	x
2	0,5	3,8
5	0,8	4,0
10	0,9	4,2
20	0,95	4,3
50	0,98	4,6
100	0,99	4,8

Porcentaje por dirección			
E	ESE	SE	SSE
3,2	6,5	12,9	77,4

Olas oceánicas (Swell)

Resultado Gumbel		
Tr	F(x)	x
2	0,5	3,1
5	0,8	3,3
10	0,9	3,5
20	0,95	3,7
50	0,98	4,0
100	0,99	4,1

Porcentaje por dirección			
E	ESE	SE	SSE
16,7	6,7	43,3	33,3

**Tabla 3.2. Valores Extremos de Oleaje en el Punto A**

Olas locales generadas por viento

Resultado Gumbel		
Tr	F(x)	x
2	0,5	3,6
5	0,8	3,9
10	0,9	4,0
20	0,95	4,2
50	0,98	4,4
100	0,99	4,5

Porcentaje por dirección			
E	ESE	SE	SSE
	4,0	80,0	16,0

Olas oceánicas (swell)

Resultado Gumbel		
Tr	F(x)	x
2	0,5	3,2
5	0,8	3,5
10	0,9	3,7
20	0,95	3,9
50	0,98	4,2
100	0,99	4,4

Porcentaje por dirección			
E	ESE	SE	SSE
	14,8	77,8	7,4

**Tabla 3.3. Valores Extremos en el Punto B**

## 4 RELEVAMIENTO DE LA COSTA Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO EROSIVO

La naturaleza geológica del sustrato y la magnitud de los procesos naturales que actúan sobre los mismos, permiten caracterizar al sector como una costa en erosión, tanto por efecto del mar como por la acción de los excedentes pluviales sobre las barrancas y fenómenos de erosión en masa asociados a ambas causas.

Los acantilados constituidos por material granular (mezcla de arena y gravas) resultan fácilmente erosionables por la acción del escurrimiento superficial, originado por eventos de precipitaciones intensas, y la acción combinada de temporales de fuerte oleaje y niveles extraordinarios de marea.



**Figura 4. 1: Acantilado erosionado por efectos del oleaje y escurrimientos superficiales debidos a excedentes pluviales**

De esta manera, el acantilado actúa como fuente de aporte sedimentario que se deposita inicialmente sobre el pie del mismo para ser luego arrastrado por las corrientes generadas por acción del oleaje de incidencia oblicua sobre la costa, dando lugar al proceso comúnmente denominado como transporte longitudinal.

En el mes de septiembre de 2007 se realizó una visita de reconocimiento a la zona de Playa Magagna. La misma consistió en un relevamiento visual y fotográfico a lo largo de toda su extensión (Playa Bonita; Playa del Faro y Playa Cangrejales), en el curso de la cual pudieron observarse situaciones muy diferentes en cuanto a la ubicación de la línea de costa, que se describen a continuación:

a) Sectores muy expuestos a la acción de oleaje donde el retroceso del acantilado se encuentra en un estado muy avanzado y hace peligrar la conservación de algunas viviendas particulares.





**Figura 4.3: Playa Bonita, zona cercana al perfil 6'**

b) Sectores de costa protegidos naturalmente por afloraciones rocosas sobre la restinga que contribuyen a la atenuación del oleaje y reducen las posibilidades de erosión costera favoreciendo la acumulación de material sedimentario.



**Figura 4.4: Afloramiento rocoso en Playa Cangrejales – P11**



**Figura 4. 5: Zona de acumulación en cercanías del perfil  
12**

c) Sectores de costa con evidencias claras de haber sido fuertemente erosionados por efecto del escurrimiento superficial sobre el acantilado, en los cuales puede observarse la formación de cárcavas y canales de escurrimiento.



**Figura 4.6: Formación de cárcavas por escurrimiento  
superficial en Playa Bonita**



**Figura 4.7: Canal de escurrimiento pluvial en la zona de Playa el Faro – Perfil 9**

d) Sectores de costa donde la provincia ya ha comenzado a realizar obras para la estabilización de la línea de costa por medio de la construcción de protecciones longitudinales con gaviones.



**Figura 4.8: Construcción de gaviones en Playa Cangrejales**



**Figura 4. 9: Sector de obra finalizada al sur de Playa Cangrejales**

La información obtenida a partir de este relevamiento permite establecer los primeros indicios sobre los distintos grados de vulnerabilidad que presenta la línea costera a lo largo de su extensión.

La identificación de las zonas más afectadas por el proceso erosivo y el conocimiento de los sectores de mayor ocupación de la franja costera son elementos necesarios para la planificación de soluciones para enfrentar el problema de la erosión, permitiendo definir distintas tipologías de obras adaptables a las características de cada sector, como así también definir prioridades para la materialización de las mismas.

## 5 EVOLUCIÓN HISTORICA DE LA LÍNEA DE LA COSTA

El siguiente apartado está dedicado a estudiar la evolución histórica reciente de la línea de la costa por medio de un análisis comparativo de imágenes en tres épocas distintas de la playa.

Las fuentes de información utilizadas son fotografías aéreas verticales e imagen satelital. El período de tiempo abarcado para el estudio de la evolución es de 36 años y se realizó por comparación de la línea de costa, considerando a ésta como el límite externo del depósito de gravas presente en la playa.

La precisión del análisis con fotografías depende de diversos factores que inciden en la calidad de las mediciones efectuadas sobre las mismas. Debido a los errores inherentes a las imágenes (desplazamiento por refracción atmosférica, curvatura terrestre, etc.) y al distinto origen de las fuentes de información (distinta altura de vuelo, errores en la manipulación de las imágenes, etc.), sólo permiten realizar una comparación de tipo cualitativo.

En las **Figuras 5.1 a 5.3** se presenta comparativamente la posición de la línea de la costa en 1971 (relevamiento aerofotogramétrico Servicio de Hidrografía Naval) y en 1995 (relevamiento Catastro provincia de Chubut).

En las **Figuras 5.4 a 5.6** se ha realizado la comparación entre el mismo relevamiento de 1971 y una imagen satelital del año 2002.

En todos los casos las imágenes se han reducido a la misma escala para poder estimar la posición de la línea de costa en cada una.

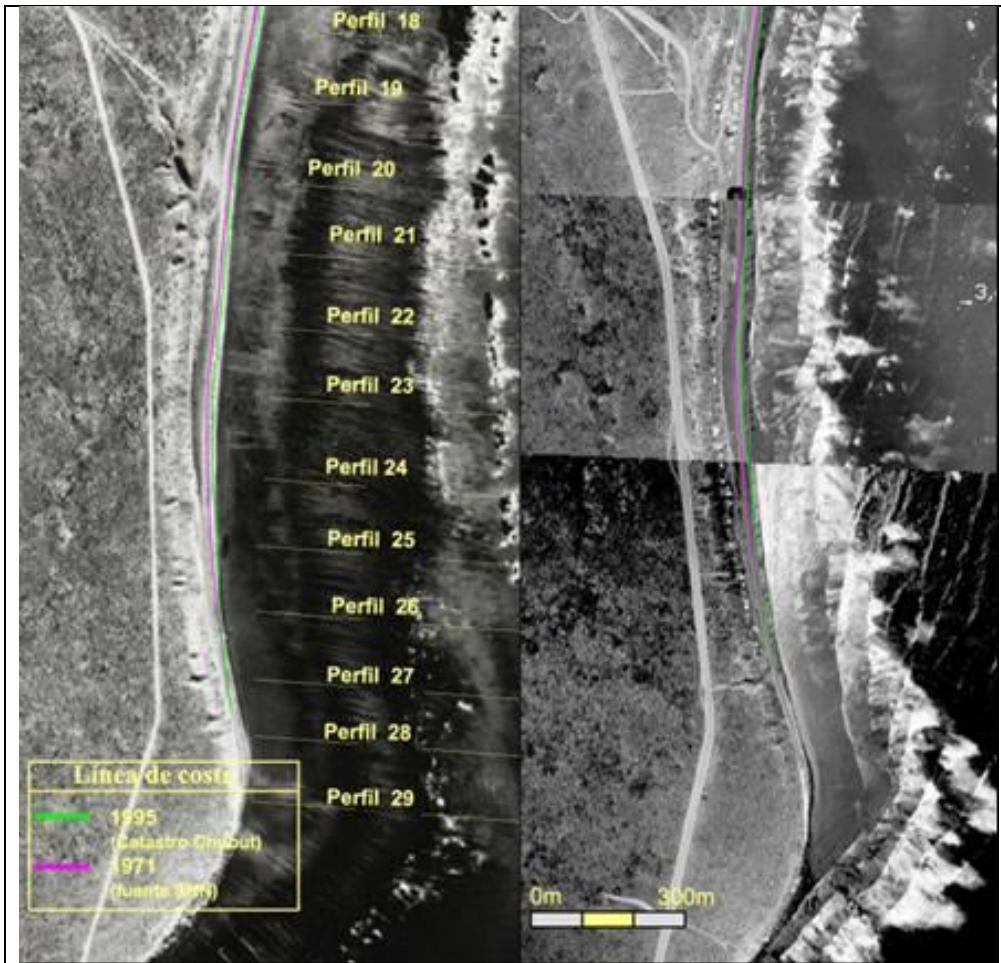
En todas las imágenes puede notarse el fuerte desarrollo urbano sobre el área costera ocurrido con posterioridad a 1971.



**Figura 5.1: Evolución histórica de la línea de costa (Perfiles 5 al 8)**



**Figura 5.2: Evolución histórica de la línea de costa. (Perfiles 8 al 20)**



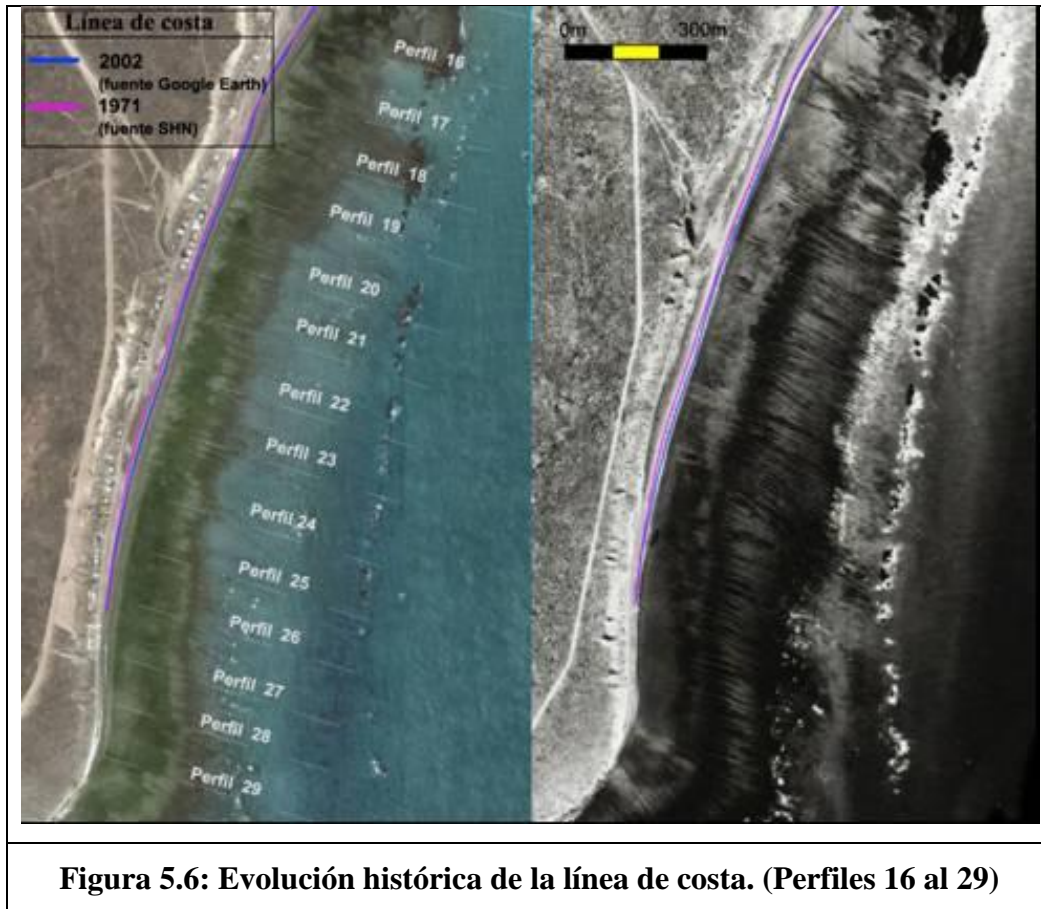
**Figura 5.3: Evolución histórica de la línea de costa. (Perfiles 18 al 29)**



**Figura 5.4:** Evolución histórica de la línea de costa. (Perfiles 5 al 8)



**Figura 5.5:** Evolución histórica de la línea de costa. (Perfiles 7 al 17)



El análisis de las distintas imágenes y el trazado (aproximado) de la línea de costa, permite establecer que en términos generales los cambios en la morfología de la playa no fueron significativos en las últimas tres décadas. En cambio sí se produjo un fuerte cambio demográfico en la zona.

En las fotografías correspondientes al año 1971 se observa la escasa o nula población, mientras que en los últimos 10 años el aumento del grado de urbanización es notorio.

Cabe destacar que este desarrollo urbano costero ha ocupado inicialmente las áreas planas de la zona, limitadas a una angosta franja costera entre la playa y la base del acantilado. Posteriormente también ha avanzado sobre los terrenos de mayor relieve aledaños a las mismas, como es el caso de las barrancas y acantilados que limitan playa Magagna.

En base a este análisis histórico y al trabajo de campo (**capítulo 4**), puede señalarse que debido a las características físicas de la zona, a la magnitud de los procesos naturales anteriormente mencionados y la acción antrópica sobre el sistema, la velocidad de transformación de la costa aumentó considerablemente en los últimos años.

## 6 RETROCESO DE LA LÍNEA DE COSTA POR ACCIÓN DE TEMPORALES

En este Capítulo se presenta una metodología que intenta evaluar el efecto erosivo que sobre el acantilado ejerce la acción marina en ocurrencia de temporales de oleaje intenso asociados a niveles extraordinarios de marea. Esto se realiza con vistas a aportar elementos de juicio que contribuyan a establecer grados de vulnerabilidad de distintos tramos de la costa en estudio.

Cabe destacar que el método de cálculo utilizado fue desarrollado para ser aplicado inicialmente en playas de arena con diámetros característicos de material inferiores a los que pueden encontrarse en Playa Magagna, por lo tanto, éste resulta una herramienta que presenta algunas limitaciones en la presente aplicación, y los resultados obtenidos deben ser considerados como una aproximación de la realidad y valorados por su carácter orientativo.

### 6.1 Método de convolución para estimar la erosión por temporales

La forma del perfil de una playa es producto de la interacción de los agentes dinámicos que actúan sobre ella y de las propias características físicas de la costa, siendo el oleaje el agente energético más importante a la escala usual de la Ingeniería de Costas.

La geometría del perfil de la playa se halla asociado básicamente a la acción del transporte transversal de sedimento que, a su vez, depende del oleaje, del viento, y del nivel relativo del mar (marea). Bajo la acción de tormentas, en las que el oleaje que actúa en la playa es de gran contenido energético, se produce una erosión de la parte alta del perfil retrocediendo la línea de orilla y transportándose el material removido mar adentro, siendo depositado la mayor parte de las veces en forma de barras sumergidas. El resultado final es una disminución de la pendiente del perfil. La escala temporal a la que se producen estos cambios es del orden de horas (la duración de la tormenta).

La predicción de este tipo de cambios se puede hacer, en primera instancia, utilizando parámetros o "predictores" del perfil de playa. Estos parámetros, empíricos en su mayor parte, predicen el estado final del perfil en función de características del oleaje, del sedimento que compone la playa y, en algunos casos, de la pendiente del perfil inicial.

Un concepto básico para el desarrollo de esta temática es el de "perfil de equilibrio", definiéndose como tal un perfil ideal que es aquél que disipa de forma uniforme la energía incidente sobre el mismo. Puesto que el oleaje es variable en el tiempo, el perfil de equilibrio representa un estado virtual, sobre el cual se producirán fluctuaciones en función de las características del oleaje incidente.

Existen diversas expresiones para determinar el perfil de equilibrio de una playa basadas en curvas de tipo potencial (Dean, 1977,1991), exponencial (Bodge, 1992; Komar y McDougal, 1994), o considerando la variación del tamaño de sedimento a lo largo del perfil (Larson<sup>4</sup>, 1991):

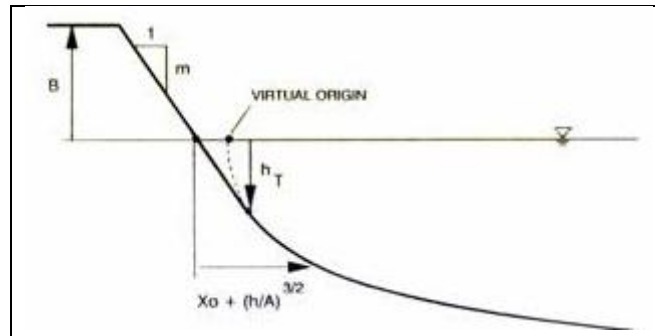
$$y = \frac{h}{m} + \frac{1}{A^{3/2}} h^{3/2} \quad (6.1)$$

siendo  $y$  la distancia hasta la costa,  $h$  la profundidad local,  $m$  la pendiente de la playa en el entorno de la línea de orilla y  $A$  un parámetro que depende de las características del sedimento.

En las proximidades de la línea de orilla predomina el primer término de la ecuación (6.1), quedando  $h=m.y$ , es decir una playa con pendiente uniforme, mientras que, a medida que aumenta la distancia a la orilla, predomina el segundo término, quedando  $h = A y^{2/3}$  que es la expresión clásica del perfil de Dean (1977) (**Figura 6.1**).

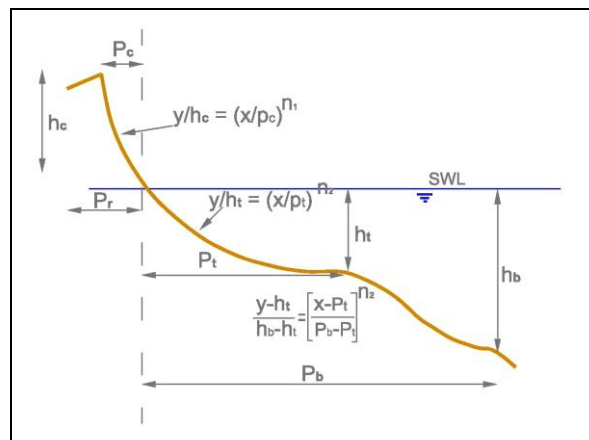
---

<sup>4</sup> *Evolución en Planta/perfil de una Playa, Métodos Predictivos*. Agustín Sánchez-Arcilla, José Jimenez. Ingeniería del Agua, Vol. 2 Número extraordinario, Abril 1995, pp 119.



**Figura 6.1: Perfil de equilibrio (Dean, 1977)**

Para playas de gravas Powell<sup>5</sup> desarrolló otro modelo para predecir la forma del perfil. El mismo está compuesto por tres curvas de tipo potencial, las cuales dependen de las características de ola en rotura y el tamaño del sedimento (**Figura 6.2**).



**Figura 6.2: Esquema de perfil en playa de gravas**

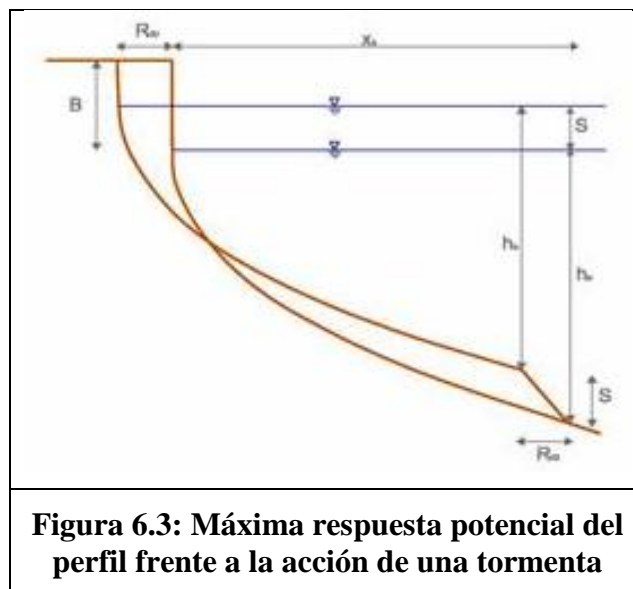
A la hora de aplicar este tipo de expresiones de perfil de equilibrio hay que tener en cuenta que éstas predicen una forma simple de perfil, en la cual se representa una situación ideal asociado a un estado de mar determinado, y por lo tanto, no se consideran características morfológicas tales como barras, surcos, etc.

<sup>5</sup> “*Predicting the Short Term Profile Response for Shingle Beaches*” Powell K A. Hydraulics Research Report SR219, Wallingford, Feb 1990.

A pesar de la simpleza del concepto, una de las utilidades más importantes de esta herramienta consiste en su aplicación para estimar la respuesta del perfil bajo la acción de una tormenta. En estos casos, el perfil de equilibrio corresponde a un estado de “equilibrio extremo”, denominado perfil de erosión. La forma óptima de calcular este “perfil de erosión” sería estimar el transporte de sedimento que se produce bajo la acción de la tormenta y las modificaciones consiguientes que se producirán en el perfil.

Kriebel y Dean<sup>6</sup> (1993) proponen un método analítico para estimar la erosión que se produce en un perfil de playa ante la acción de una tormenta, caracterizada por un nivel de sobreelevación del mar y una altura de ola determinada, partiendo del concepto del perfil de equilibrio antes descrito.

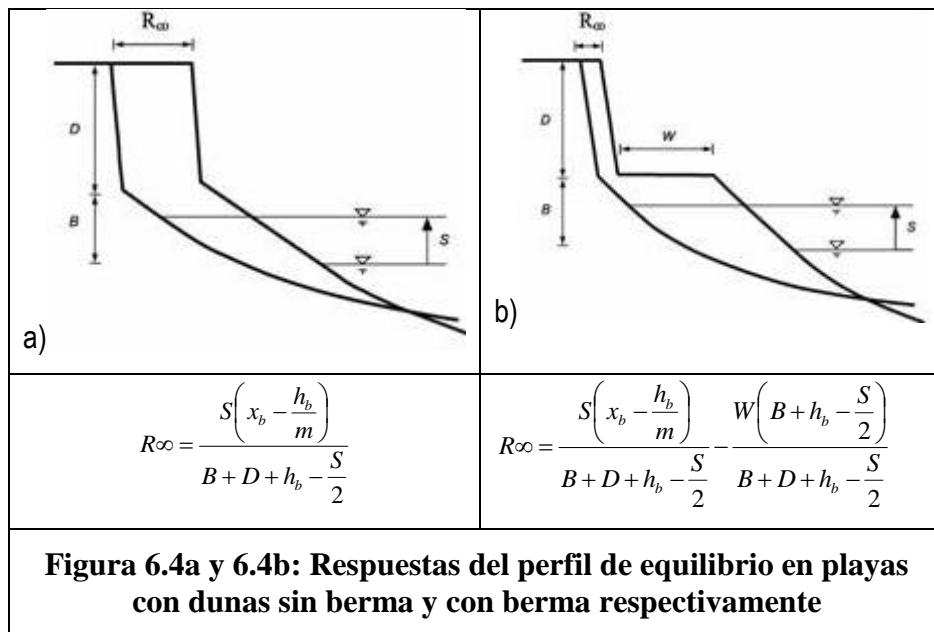
Este procedimiento, conocido como el *método de convolución*, permite obtener una estimación de la erosión máxima esperable,  $R_{\infty}$ , bajo la acción de una tormenta con una sobreelevación del nivel del mar  $S$ , (“*storm surge*”) y una zona de rotura caracterizada a través de una profundidad  $h_b$  y una anchura  $x_b$  para un perfil con pendiente  $m$  ( **Figura 6.3**).



<sup>6</sup> “*Convolution Method for Time-Dependent Beach-Profile Response*” David L. Kriebel, Robert G. Dean, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE Vol. 119 N°2, 1993.

El método parte de un perfil de equilibrio inicial que responde al modelo de Dean y calcula la máxima erosión potencial (retroceso de la línea de costa) a partir de una ecuación de balance entre volumen erosionado y volumen depositado en función de un nuevo perfil de erosión.

El método es aplicable a distintos tipos de costas y en función de las características particulares que presente el perfil de la playa en estudio, permite adoptar diferentes tipologías, cada una, con expresiones de cálculo propias. En las **Figuras 6.4a y 6.4b** se presentan el esquema y las ecuaciones del modelo para el cálculo de la erosión en playas con dunas (o acantilados) sin berma y con berma, respectivamente.



Según el modelo desarrollado por Kriebel y Dean<sup>6</sup>, la playa como sistema lineal, tiene una respuesta exponencial que puede expresarse con una función erosiva dependiente del tiempo. Así, la ecuación diferencial que gobierna la respuesta del perfil es:

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{T_s} [R_{\infty} f(t) - R(t)] \quad (6.2)$$

En donde  $R(t)$  es la erosión (retroceso de la línea de costa) en un tiempo  $t = T_D$  (duración de la tormenta),  $R_\infty$  es la máxima erosión potencial,  $f(t)$  es la función erosiva y  $T_S$  es la escala de tiempo de erosión que gobierna la tasa de respuesta del perfil.

En este capítulo, se resuelve esta ecuación diferencial bajo la forma de la integral de convolución. De esta manera se puede estimar la respuesta del perfil de la playa en función del tiempo con tormentas severas:

$$R(t) = \alpha R_\infty \int_0^t e^{-\alpha(t-\tau)} f(\tau) d\tau \quad (6.3)$$

El desarrollo completo del método y la solución de la integral de convolución se encuentran en la bibliografía citada.

## 6.2 Aplicación del Método

Más allá de las limitaciones que por su simplicidad presenta el modelo de convolución, y teniendo en cuenta una serie de simplificaciones que es necesario realizar para su aplicación en Playa Magagna, este método fue aplicado para analizar el proceso erosivo en los distintos tramos que componen este sector de la costa.

El propósito fundamental de este análisis se centra en la identificación de los sectores más expuestos de la costa y en el análisis comparativo de situaciones que permiten estimar la reducción de los niveles potenciales de la erosión por efectos de acumulación de sedimentos o variación del nivel del mar. Dado que se han aplicado herramientas de cálculo simples, las tasas de erosión o retroceso de línea de costa actuales determinadas no deben ser considerados desde un punto de vista cuantitativo.

### 6.2.1 Erosión para niveles extraordinarios de marea

Se realizó una primera evaluación para un conjunto de escenarios (alturas y períodos de oleaje, y dirección de incidencia normal a la costa) para la máxima pleamar astronómica  $NM = 3.59$  m (cota MOP).

Se utilizaron los resultados de la aplicación del modelo Bouss-2D SMS para la propagación del oleaje hasta la línea de costa (ver **Parte 1 - Clima de Olas Informe LHA 268-01-07**) y se adoptó la forma simplificada (esquema de equilibrio idealizado) para los 8 perfiles de control anteriormente seleccionados. Se calcularon los valores de  $R(t)$  correspondientes a cada situación en los tres tramos de la costa bajo la acción de diferentes temporales de oleaje.

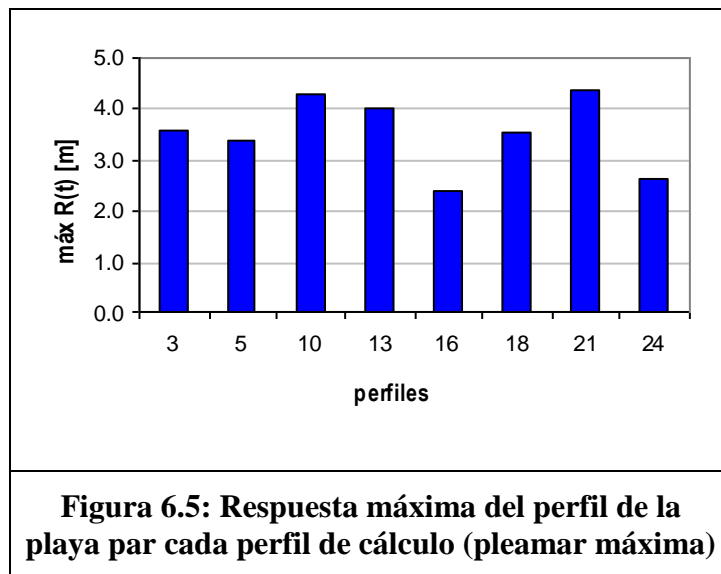
Una de las dificultades que surgen en la aplicación de este modelo en la zona de Playa Magagna se encuentra vinculada al elevado valor de amplitud de la marea astronómica que se observa en la región. Esto se traduce en variaciones significativas del nivel del mar en períodos de tiempo relativamente cortos y, consecuentemente, modifica sustancialmente las características del oleaje en la zona costera. Por tal motivo, dado que el modelo asume condiciones constantes de sobreelevación del nivel del mar  $S$  y altura de rotura de ola  $H_s$ , se estableció que en todos los casos de aplicación la duración del temporal fuese de 2 horas, asumiendo que para este intervalo de tiempo es aceptable suponer que el nivel del mar puede mantener valores aproximadamente constantes.

El **Anexo II** muestra el resultado de la aplicación del método de convolución. En éste, para cada perfil analizado, se presentan los datos de entrada correspondientes a cada escenario ( $H_s$ ;  $T_p$ ;  $L_o$ ;  $S$ ;  $H_b$ ;  $h_b$ ) junto con el valor de  $R(t)$  (retroceso de costa) obtenido en cada caso.

Cabe aclarar que el nivel de sobreelevación del mar  $S$  utilizado en esta aplicación corresponde al valor de set-up inducido por la rotura del oleaje y fue calculado a partir de la expresión de Longuet-Higgins y Steward (1963)<sup>7</sup>

$$S_w = 0.15 \times d_B - \frac{g^{1/2} (H_o)^2 T}{64 \times \pi \times d_B^{3/2}}$$

Analizando el conjunto total de resultados, se observó que los mayores valores de retroceso de la línea de costa se obtendrían, para todos perfiles estudiados, con el escenario correspondiente a un oleaje de incidencia normal a la costa con:  $H_s = 3.5\text{m}$ ,  $T_p = 8\text{s}$ . Estos resultados son presentados en la **Figura 6.5**.



Los valores de  $R(t)$  indicados en la **Figura 6.5** dan una idea del grado de vulnerabilidad que presenta cada sector de la costa frente a la acción de temporales intensos, permitiendo así identificar las zonas potencialmente más expuestas y las más protegidas del ataque de las olas.

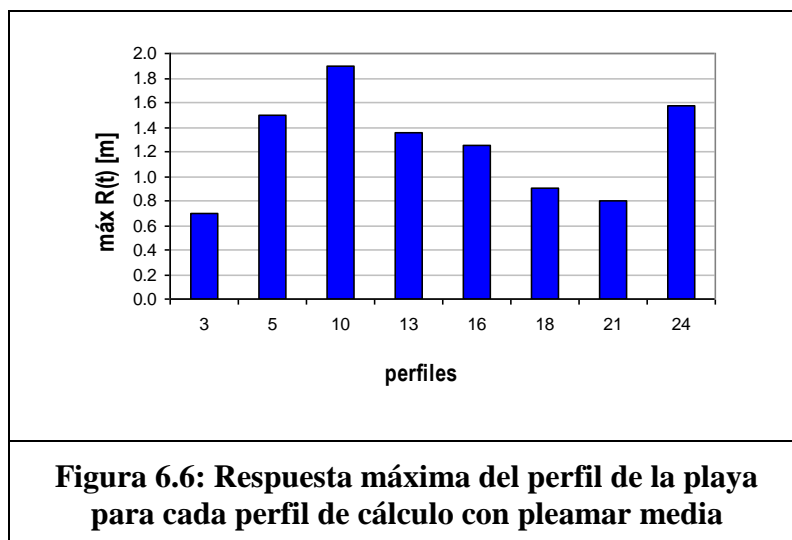
<sup>7</sup> “A Note on Wave Setup”; Longuet-Higgins, M. S. y R. W. Steward (1963). *Journal of Marine Research* (vol. 21-1, pp. 4 a 10)

Cabe señalar que estos valores representan situaciones de erosión máxima y resultan útiles como valores de referencia, pero difícilmente puedan observarse en la realidad puesto que representan una situación donde se combinan un oleaje extremo con un nivel de marea excepcionalmente alto, lo cual tiene una probabilidad de ocurrencia muy baja.

Como se mencionara anteriormente, uno de los objetivos fundamentales de esta aplicación es el de poder comparar estos valores de erosión máxima con los que pueden esperarse al producirse alguna modificación en los factores que intervienen en el cálculo, particularmente, en este estudio se analizaron dos situaciones: por un lado, el efecto de la disminución del nivel del mar; y en segundo lugar, el cambio en la forma del perfil por la incorporación de una berma.

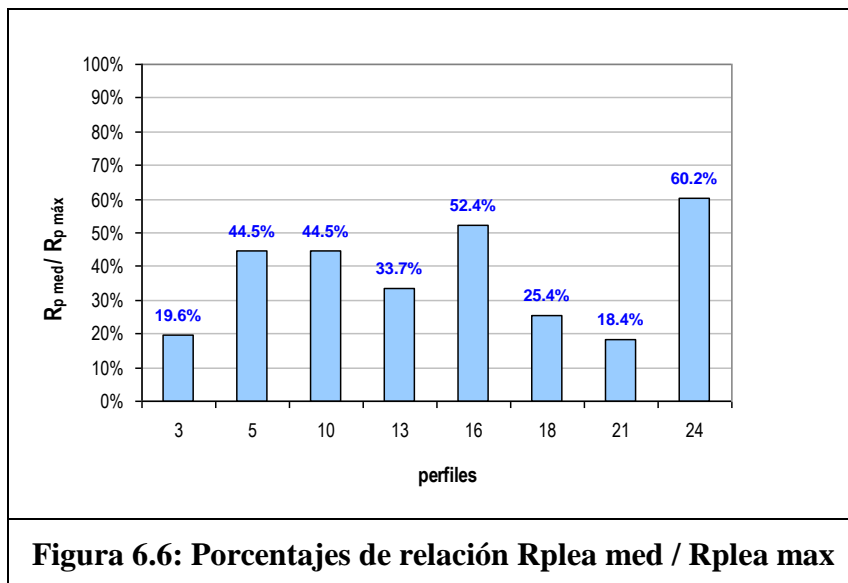
#### 6.2.2 Erosión para niveles ordinarios de marea

Con el propósito de evaluar los efectos erosivos de la acción de oleaje asociados a niveles ordinarios de marea, se utilizaron resultados del modelo Bouss-2D del SMS con una altura de ola  $H_s = 3.5\text{m}$ , período  $T_p = 9\text{s}$  (valores correspondientes a la isobata  $d = -12\text{ m MOP}$ ), y dos alturas diferentes de nivel del mar: el primero correspondiente a la pleamar media ( $NM = +2.82\text{ m MOP}$ ) y el segundo correspondiente al nivel medio de la marea ( $NM = +1.12\text{ m MOP}$ ). Los resultados de la aplicación del modelo, para cada uno de los perfiles de interés, se pueden encontrar en la **Figura 6.6**



Como es lógico, con niveles ordinarios de marea, debido a la presencia de la restinga, la rotura de la ola se produce en un punto más alejado del pie del acantilado, por tanto la afectación del oleaje incidente es menor sobre el perfil. Por otra parte, el perfil de cálculo del método de convolución es distinto, ya que aumenta la altura B+D (**Figura 6.4a**), la cual es inversamente proporcional al valor de erosión máxima potencial, con lo cual se reduce dicho valor.

Bajo estas condiciones, los resultados de la aplicación del método de convolución muestran una disminución muy importante en los valores de erosión asociados a cada perfil respecto de lo observado para la pleamar máxima. En la **Figura 6.6** se presenta la relación entre los valores de R(t) obtenidos con nivel de pleamar media (NM=2.82 m MOP) y nivel de pleamar máxima (NM= 3.59 m MOP).

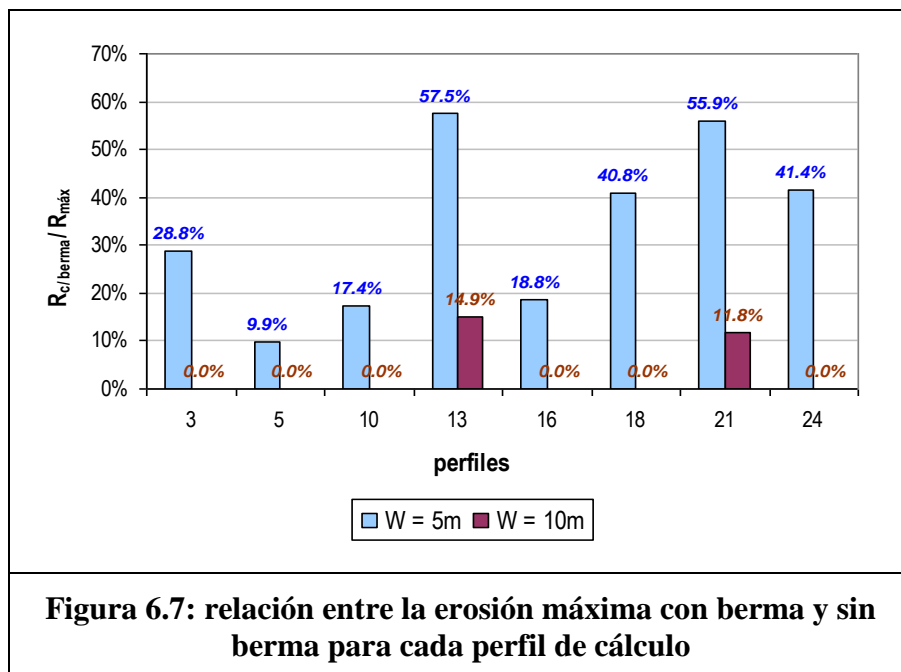


Para el nivel medio de la marea (N = 1.12m MOP), el valor promedio de altura de rotura del oleaje es de 0.4m, produciéndose, además, bastante lejos del pie del acantilado. Con lo cual, la afectación sobre el pie del acantilado es despreciable o nula en todos los perfiles analizados.

Este análisis permite observar que el acantilado se encuentra protegido naturalmente por el tipo de batimetría. Es decir, ante una leve disminución del nivel del mar, la acción erosiva del oleaje disminuye en forma considerable.

### 6.2.3 Modificación del perfil por relleno de playa

Si se efectúa el relleno de la playa con un ancho  $W$  (ver **Figura 6.4b**) se reduce la erosión máxima. El siguiente gráfico muestra una estimación de dicha reducción con la relación entre la erosión máxima con berma y sin berma ( $R_{c/berma} / R_{máx}$ ) para dos valores de  $W$  en los perfiles analizados:



De esta manera el método de convolución muestra el grado de protección natural para el acantilado que ofrece la presencia de una berma o relleno, y ayuda a definir zonas relativamente más vulnerables, y priorizar la realización de obras de control.

## 7 TRANSPORTE SÓLIDO LONGITUDINAL

Cuando el oleaje incide oblicuamente a las líneas batimétricas, las fuerzas del flujo oscilatorio que actúan sobre el fluido (tensión de radiación o radiation stress) en la zona de rompiente son generadoras de dos tipos de movimientos: uno transversal que provocará una sobre elevación del nivel hacia la playa (wave set-up) y una corriente longitudinal (longshore current) paralela a la costa.

Se denomina transporte sólido longitudinal ( $Q_L$ ) al volumen de sedimento que se mueve por unidad de tiempo paralelamente a la línea de costa. Su magnitud, y las características de su distribución espacial, constituyen uno de los datos esenciales en la mayoría de los problemas que se presentan en la ingeniería de costas.

El transporte del sedimento puede ser de dos formas diferentes: por arrastre sobre el fondo o transporte en suspensión. La cantidad de material transportado en suspensión o por arrastre depende en gran medida de la forma de la playa.

En playas disipativas, donde gran parte de la energía del oleaje es absorbida por la playa, parece más lógico pensar que el transporte se realizará predominantemente por arrastre; mientras que en playas reflectivas, por tener mayor energía la ola que se refleja, el transporte que es predominante es el de suspensión.

El tipo de transporte de sedimentos también depende en gran medida de los períodos del oleaje y del tamaño del sedimento. Así, en playas de gravas el transporte predominante es por arrastre.

A lo largo del tiempo la dirección de incidencia del oleaje va cambiando, variando el sentido del transporte. Luego, se denomina transporte longitudinal bruto ( $Q_{LB}$ ) a la cantidad de total de material transportado por unidad de tiempo en ambos sentidos, y transporte longitudinal neto ( $Q_{LN}$ ) a la diferencia entre el volumen de material transportado en uno y otro sentido por unidad de tiempo.

Cabe destacar que el transporte sólido longitudinal es fluctuante y el valor que se calcula en forma teórica corresponde a un valor medio. Es decir, el volumen transportado en un período de tiempo determinado (mes, año, etc.).

## 7.1 Método de cálculo del transporte sólido longitudinal (QL)

Un modelo ampliamente utilizado para el cálculo del transporte sólido longitudinal (transporte litoral) es el desarrollado por el CERC<sup>8</sup>, el cual es aplicable principalmente a playas de arena (diámetros menores que 0.6mm aproximadamente). Para esta formulación, el caudal de transporte depende de la altura de ola significativa en rotura, el ángulo de incidencia del frente de ola, la densidad relativa del material y un factor de calibración (K), que a su vez depende del tipo de sedimento y se obtiene de manera experimental.

La expresión de cálculo propuesta por el CERC resulta la siguiente:

$$Q_L = \frac{K}{(S-1)(1-p)} * \sqrt{\frac{g}{k}} * H_{sb}^{5/2} * \text{sen}(2\alpha_b) * f(H_o, \alpha_b) \quad (7.1)$$

donde:

$Q_L$ : caudal de transporte de sedimento [m<sup>3</sup>/s]

K: coeficiente de transporte (cuyo valor es 0.39 para playas de arena)

S: densidad relativa del sedimento

$H_{sb}$ : altura de ola significativa en rotura

$\alpha_b$ : ángulo de incidencia del frente de ola

k: índice de rotura

La facilidad con la que se puede aplicar esta fórmula ha hecho que el método del CERC para el cálculo del transporte litoral se encuentre ampliamente difundido en la literatura

---

<sup>8</sup> COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, Corps of Engineers ,US ARMY

internacional. Sin embargo, en la actualidad existen otras expresiones de cálculo que habiendo sido utilizadas en numerosas aplicaciones de distintas regiones del planeta han obtenido excelentes resultados.

Damgaard y Soulsby<sup>9</sup> desarrollaron un modelo en donde el transporte principal es por arrastre. Dicho modelo, desarrollado en las costas de Inglaterra, es aplicable a playas de gravas y cantos rodados (shingle beaches), sirviendo además para calcular la componente de arrastre de fondo en el transporte de playas de arena.

El modelo se basa en las ecuaciones de la tensión tangencial de fondo, calculada a partir del gradiente de la tensión de radiación en la zona de rompiente. Considera además la tensión tangencial debida a la velocidad orbital de la ola y presenta la ventaja de incorporar en el cálculo, de manera explícita, el tamaño del grano y el período del oleaje en las ecuaciones de cálculo.

A continuación se presentan las ecuaciones básicas del caudal de transporte. El método completo se puede encontrar en la bibliografía antes citada.

$$Q_{LS} = Máx.[Q_{LS1}; Q_{LS2}] \quad (\text{ec. 7.2})$$

$$Q_{LS1} = \frac{0,19(g \tan \beta)^{1/2} \text{sen}(2\alpha_b)^{3/2} H_{sb}^{5/2} (1 - \hat{\theta}_{cr})}{12(S-1)(1-p)} \quad \text{para } \hat{\theta}_{cr} < 1$$

$$Q_{LS1} = 0 \quad \text{para } \hat{\theta}_{cr} \geq 1$$

<sup>9</sup> *Longshore bed – load transport*. Damgaard, J.S. and Soulsby, R. L. (1997)<sup>25th</sup> *Int. Conf. Coastal Eng., Orlando, 3, pp. 3614 – 3627. ASCE*

$$Q_{LS2} = \frac{0,24 f(\beta) g^{3/8} d_{50}^{1/4} H_{sb}^{19/8}}{12(S-1)(1-p)(T)^{1/4}} \quad \text{para } \theta_{wr} \geq \theta_{wsf}$$

$$Q_{LS2} = \frac{0,046 f(\beta) g^{2/5} H_{sb}^{13/5}}{12(S-1)^{6/5} (1-p)(\pi T)^{1/5}} \quad \text{para } \theta_{wr} < \theta_{wsf}$$

donde:

$$\hat{\theta}_{cr} = f(\theta_{cr}, S, d_{50}, \beta, H_b, \alpha_b)$$

$$\theta_{wr}; \theta_{wsf} = f(S, d_{50}, \beta, H_b, \alpha_b)$$

$\theta_{cr}$  = parámetro límite de Shields

## 7.2 Aplicación en Playa Magagna

Dado que Playa Magagna predominan los sedimentos gruesos de gran tamaño, con bajo porcentaje de arena, la fórmula del CERC se encuentra fuera del rango recomendado para su aplicación. Por lo tanto, en este estudio se utilizó el modelo de Damgaard y Soulsby para el cálculo del transporte longitudinal de sedimentos.

La aplicación se realizó para un diámetro medio  $d_{50} = 20\text{mm}$  y una densidad del sólido  $\gamma_s = 2650 \text{ Kg/m}^3$ . La porosidad utilizada corresponde a los valores mínimo, medio y máximo, para depósitos de gravas<sup>10</sup>.

Dado que el caudal de transporte de sedimentos depende fundamentalmente del ángulo de incidencia del oleaje, y siendo que éste varía sustancialmente con el cambio de orientación de la costa, la aplicación de la fórmula requirió de la subdivisión de la zona de Playa Magagna en 12 tramos costeros, para los cuales se supuso una orientación constante y se realizó el cálculo puntual del valor de  $Q_{SL}$  correspondiente.

Las ecuaciones fueron aplicadas para un registro de datos que representan el clima medio anual de olas y se encuentran agrupados en un conjunto de matrices, cada una de

<sup>10</sup> *Hidrología subterránea* .E. Custodio y M. R. Llamas. Ediciones Omega S. A. Barcelona, 1976 (cap. 8.26, p. 468).

ellas asociada a un rango de dirección de incidencia del oleaje, conformadas por valores de Hs y Tm con una frecuencia de ocurrencia determinada. Estos datos corresponden a los resultados obtenidos en la **Parte 1 - Clima de Olas Informe LHA 268-01-07**. Las **Tablas 1 a 36**, ubicadas en el **Anexo V** de dicho informe, muestran la matrices de datos utilizadas tanto para olas generadas por vientos locales como para las olas oceánicas.

### 7.3 Resultados

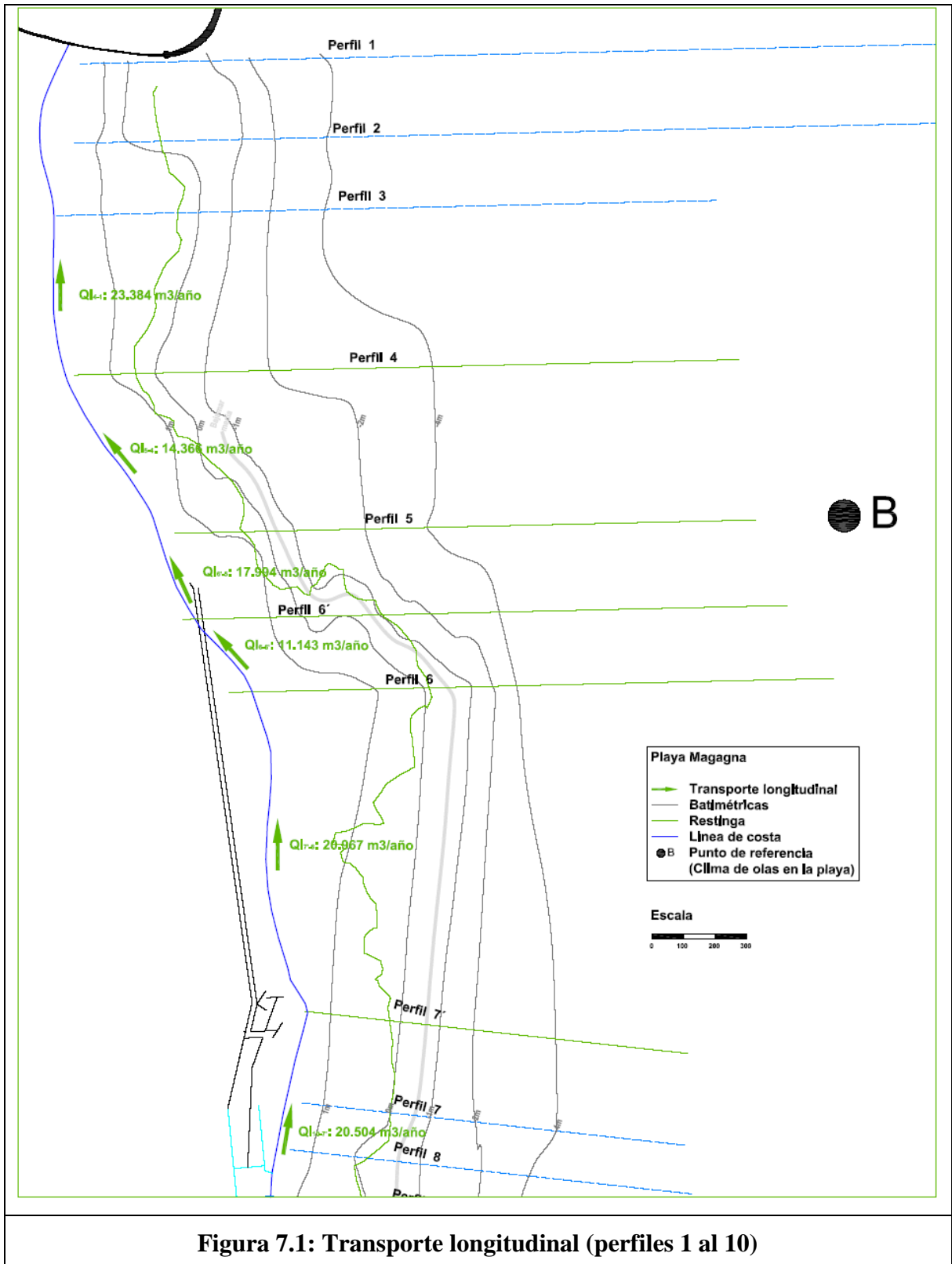
En la **Tabla 7.1** se presentan los resultados obtenidos de la aplicación del modelo de transporte de Soulsby, indicándose para cada tramo de costa el valor de transporte sólido anual para tres porosidades diferentes. Estos resultados señalan la existencia de una tasa potencial de transporte moderada, y una componente neta de S a N debida básicamente a la contribución de las olas oceánicas.

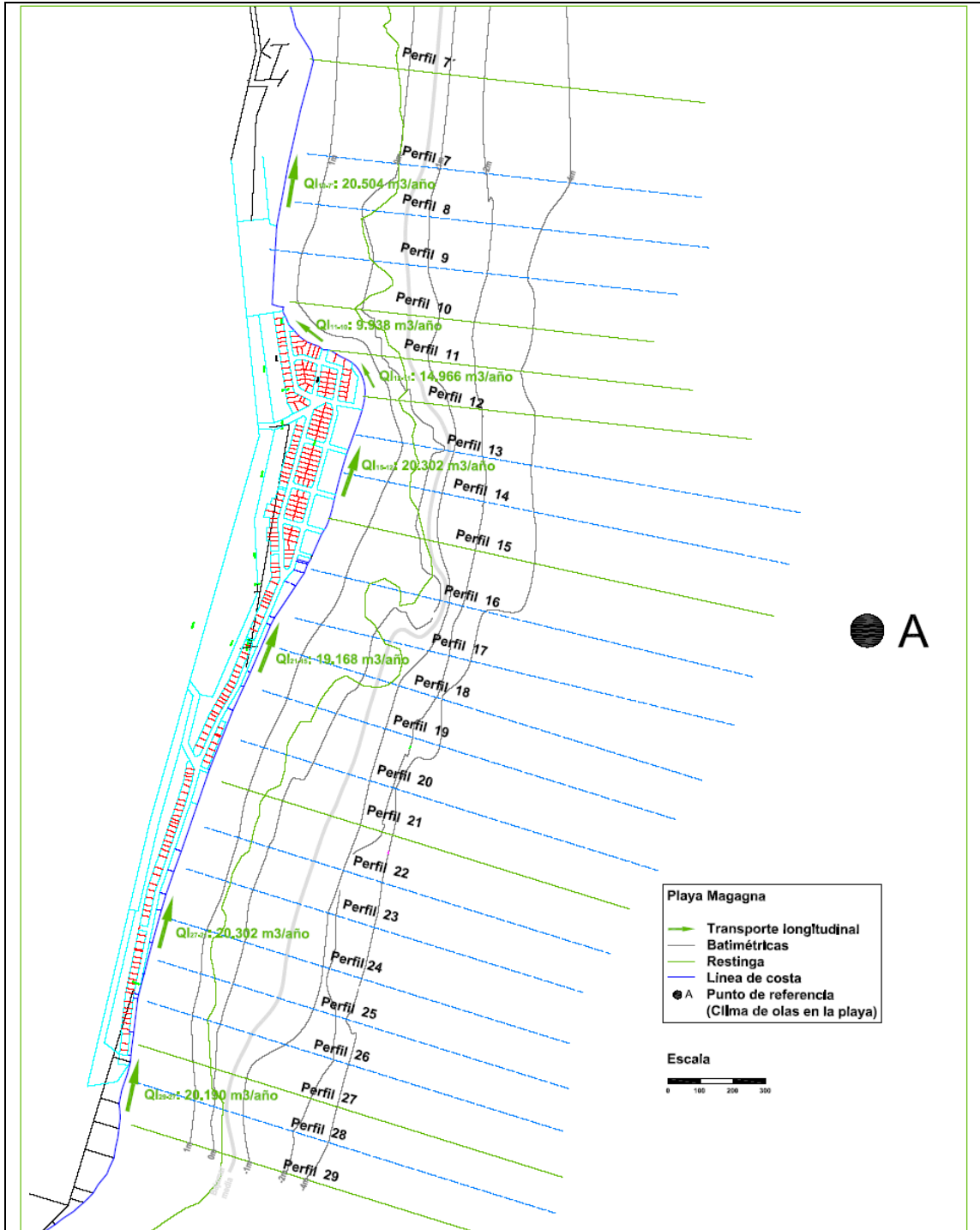
**Tabla 7.1:** Resultados del transporte sólido longitudinal

perfil	porosidad	Q (m³/año)	perfil	porosidad	Q (m³/año)
<b>1 al 4</b>	0.25	21825	<b>10 al 11</b>	0.25	9276
	0.30	23384		0.30	9938
	0.40	27281		0.40	11595
<b>4 al 5</b>	0.25	13409	<b>11 al 12</b>	0.25	13968
	0.30	14366		0.30	14966
	0.40	16761		0.40	17460
<b>5 al 6'</b>	0.25	16794	<b>12 al 15</b>	0.25	18949
	0.30	17994		0.30	20302
	0.40	20993		0.40	23686
<b>6' al 6</b>	0.25	10400	<b>15 al 21</b>	0.25	17890
	0.30	11143		0.30	19168
	0.40	13000		0.40	22362
<b>6 al 7'</b>	0.25	19569	<b>21 al 27</b>	0.25	18949
	0.30	20967		0.30	20302
	0.40	24461		0.40	23686
<b>7' al 10</b>	0.25	19137	<b>27 al 29</b>	0.25	18844
	0.30	20504		0.30	20190
	0.40	23922		0.40	23555

En la aplicación de la ecuación se ha considerado que el transporte de sedimentos ocurre sólo durante una fracción  $t'/T$  del total del tiempo, siendo  $T$  la duración de un ciclo de marea (aproximadamente 12,5 horas) y  $t'$  el tiempo en que el nivel del mar excede un valor determinado. Para este último se adoptó el promedio entre el nivel medio (1,12 m MOP) y la pleamar astronómica media (2.82 m MOP), resultando así un nivel del mar de 2 m MOP. Bajo estas hipótesis el valor  $t'/T \cong 0.2$  y el transporte anual de sedimentos calculado por la ec.(7.2) fue afectada en esa misma proporción.

Con el propósito de facilitar la interpretación de estos resultados, en las **Figuras 7.1 y 7.2** se presenta la distribución del transporte a lo largo de la costa para el valor medio de la porosidad, lo cual permite observar claramente como se modifican los valores del transporte en función de la orientación de la costa.





**Figura 7.2: Transporte longitudinal (perfiles 7 al 29)**

Cabe destacar que los valores calculados de  $Q_L$  representan un transporte sólido "potencial", es decir que constituyen el volumen máximo de material que el oleaje

podría mover en un año promedio en caso de que ese material se encontrara disponible para el transporte.

Más allá de la incertidumbre que se encuentra asociada a estos valores, y al valor real que efectivamente el oleaje puede transportar cada año, es importante observar las diferencias relativas que se presentan entre los distintos tramos de la costa. Dichas diferencias entre valores de  $Q_L$  para tramos contiguos permiten identificar zonas con tendencia a la acumulación de material o al retroceso de la playa.

Es así como, por ejemplo, para el entorno del Perfil 6' (**Figura 7.2**) existe una clara tendencia al retroceso de la playa, puesto que la relación entre el caudal entrante y el saliente resulta inferior a 1:  $Q_{6'-6} / Q_{5'-6} = 0.62$ . Por el contrario, para el Perfil 12 (**Figura 7.1**) los resultados señalan la tendencia a la acumulación de material, siendo  $Q_{12-15} / Q_{11-12} = 1.36 > 1$ .

El estudio de la dinámica del transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de toda la extensión de la zona de Playa Magagna constituye una herramienta fundamental para la planificación de obras transversales a la línea de costa. Este tipo de obra se presenta como una alternativa viable para la captación del material sólido transportado por el oleaje o para la contención de un volumen aportado artificialmente, lo cual, como se vio en el capítulo anterior, puede representar una alternativa eficaz de protección contra los procesos físicos que generan el retroceso de la línea de costa.

## 8 DIAGNÓSTICO DE SITUACION Y ZONIFICACION

El relevamiento visual y fotográfico realizado en la zona permitió observar que, en líneas generales, el sector sur de la costa de Playa Magaña presenta evidencias de un proceso erosivo de la base de los acantilados que la componen. Al mismo tiempo es posible establecer la existencia de grandes acumulaciones de cantos rodados en el sector norte, en las proximidades de la escollera sur del puerto de Rawson, que es una estructura que impide la continuidad del transporte de sedimentos hacia el Norte, favoreciendo su acumulación sobre la playa.

La observación de las características geográficas de playa Magagna y su entorno muestra que, hacia el Sur, la costa presenta un cambio pronunciado en su orientación. Dadas las características del clima direccional de olas, cabe suponer que ese cambio de orientación impedirá o limitará el flujo de material sedimentario desde el S hacia la zona de Playa Magagna. Por otra parte, en el extremo Norte, la Escollera Sur del Puerto de Rawson constituye una barrera al movimiento de sedimentos que se mueven desde el Sur.

Puede suponerse entonces que desde el punto de vista del transporte de sedimentos, que el mismo tiene una componente neta de sur a norte, y la costa entre estos dos límites se comporte básicamente como un sistema cuasi-cerrado, siendo la principal fuente de aporte de material a la playa el material resultante de la degradación de los acantilados activos del tramo en cuestión.

Los resultados del estudio de transporte longitudinal de sedimentos debido a las olas que llegan a la costa (**Capítulo 7**) fueron concordantes con esto, y mostraron claramente que el sentido de transporte es de sur a norte a lo largo de toda la costa en estudio.

Esta circunstancia indica cuál es el sentido del movimiento neto promedio del sedimento a lo largo de la costa durante un período prolongado. Ello no significa que el retroceso de la línea de costa en esta zona esté originado por un desbalance longitudinal en el volumen de material transportado por las corrientes litorales, particularmente

cuando los resultados cuantitativos de transporte determinado, aunque sólo indicativos, muestran valores muy moderados.

Además de la evidencia de campo, la hipótesis de que la degradación de los acantilados y el consecuente retroceso de la línea de costa se encuentran asociados a la acción hídrica, fue respaldada mediante la aplicación de una teoría simple que mostró la vulnerabilidad del acantilado frente a la ocurrencia de eventos extremos de olas y nivel del mar. No obstante, la esporádica ocurrencia de temporales de fuerte oleaje combinados con niveles elevados de marea es sólo una componente del factor hídrico, a la que se agregan las infrecuentes pero intensas lluvias, y el drenaje de los excedentes pluviales a través de sistemas de cárcavas.

Dadas la génesis y composición del acantilado, bajo las acciones indicadas, éste se transforma en una fuente de aporte de materiales de muy diversa granulometría, desde materiales limo-arenosos a gravas y rodados. La acción marina puede arrastrar y relocalizar fácilmente la fracción más fina, en tanto que la fracción gruesa tiende a formar cordones litorales al pie de los acantilados.

De acuerdo a lo observado en el área costera, a la evolución histórica de la línea de costa, a la evaluación de los mecanismos de erosión, y a la ocupación territorial de la costa, se ha considerado conveniente dividir el tramo costero en estudio en los siguientes tramos parciales, para los cuales podrán proponerse distintas tipologías de obra de ingeniería con diferente prioridad en su materialización, en función tanto de la solución que se requiera como de la intensidad estimada de los procesos de retroceso.

**Tramo 1:** Franja costera de aproximadamente 1600 m de extensión, ubicada en el extremo norte de Playa Magagna, comprendida entre el Perfil 1 y el Perfil 5. Se trata de una zona de escasa ocupación poblacional donde se observa una playa extensa con gran acumulación de materiales gruesos y no hay evidencias de la existencia de procesos erosivos.

**Tramo 2:** Sector de costa de 2400 m de extensión, comprendido entre el Perfil 5 y el Perfil 10. Se trata de una zona de erosión incipiente que abarca parte del área de Playa

Bonita y Playa del Faro. En este tramo de la costa existe un nivel importante de desarrollo urbano y pueden observarse sectores particularmente comprometidos, donde viviendas y caminos se encuentran en riesgo por el marcado retroceso de la línea de costa. Dado el avance del proceso erosivo, este tramo de la costa es el que en la actualidad presenta las mayores urgencias en cuanto a los requerimientos de planificación de obras.

**Tramo 3:** Se trata de un tramo corto de costa, de aproximadamente 450 m de extensión, ubicado en el extremo norte de Playa Cangrejales entre el perfil 10 y el Perfil 12. Esta zona se encuentra densamente poblada y naturalmente protegida por la orientación de la costa y por un importante afloramiento rocoso sobre la restinga. No presenta riesgo de erosión inmediato por la acción marina, pero sí podría producirse la degradación de algún sector puntual del acantilado si no se controla el efecto del escurrimiento generado por excesos pluviales.

**Tramo 4:** Franja costera con una extensión aproximada de 750 m, ubicada en el sector norte de Playa Cangrejales, comprendida entre el Perfil 12 y el Perfil 17. Esta es una zona de acumulación de material generando una buena extensión de la playa que constituye una defensa natural para la costa. En este sector se observa una distancia importante entre el área urbanizada y la línea costera, por lo cual, en la actualidad, no existe infraestructura comprometida y no es necesario proyectar ningún tipo de obra.

**Tramo 5:** Comprende un importante sector de Playa Cangrejales hasta el extremo sur de Playa Magagna donde se encuentra la Punta Castro. Abarca una extensión aproximada de 1700 m, entre el Perfil 17 y el Perfil 29. Se trata de una zona de la costa muy expuesta a la acción de temporales, donde se pueden observar sectores que evidencian procesos de erosión localizada importantes, tanto por la acción marina como por el escurrimiento superficial. Este hecho ha motivado la reciente construcción de una protección con gaviones planificada por la DGIP con el propósito de preservar parte de la infraestructura existente, evitando la continuidad del proceso de retroceso costero y generando, además, la recuperación de alguna porción de área de costa por medio de la ejecución de rellenos. Si bien estas obras han resuelto en, primera instancia, los

problemas de erosión más urgentes, es necesario realizar en forma constante un seguimiento de las mismas, además de realizar el monitoreo de otros sectores de este tramo que puedan resultar afectados por la erosión.

## 9 LINEAMIENTOS GENERALES PARA LA ESTABILIZACION DE LA COSTA

La propuesta de obras de defensa costera que se desarrolla en este Capítulo incorpora una evaluación de los siguientes elementos:

- Tipología de obra
- Dimensiones típicas en función de aspectos oceanográficos
- Aspectos constructivos
- Aspectos ambientales

### 9.1 Planteo de obras de defensa

Las medidas de protección costeras se implementan el general para defender de la erosión marina la propiedad pública y privada, obras de infraestructura como así también para la preservación de valores recreacionales y estéticos.

La elección de una apropiada estrategia para la defensa de una costa debe ser realizada a la luz de la respuesta dinámica de la playa, de la capacidad de recuperación y de la extensión del retroceso costero.

Las actuaciones en la costa dependen de los objetivos que se persiguen, y del origen del problema que debe controlar. Una diversidad de soluciones son posibles para el control del riesgo de retroceso costero<sup>11</sup>. El manejo costero puede implicar la regulación del espacio costero para evitar el riesgo generado por la erosión, o bien proponer el uso de técnicas de ingeniería “blandas” o “rígidas”

---

<sup>11</sup> *Alternative Shore Protection Strategies: Innovative Options and Management* Jennifer Lyne Dare. Project Report Submitted To Marine Resource Management Program College of Oceanic and Atmospheric Sciences Oregon State University Corvallis, OR 97333 July 11, 2003 in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science September 2003.

Dentro de las **obras de defensa blandas** suelen englobarse aquellas en que únicamente se actúa sobre el material sedimentario que compone la playa. Los métodos de ingeniería blanda apuntan entonces a trabajar a partir de la naturaleza dinámica de la playa; el más difundido y conocido método es el de alimentación artificial de playas.

Una estrategia de origen relativamente reciente es el uso de lo que se ha denominado “*revestimientos dinámicos*” o bermas de grava o canto rodado. Este tipo de defensa consiste en la construcción de una playa de materiales gruesos sobre el frente costero a ser protegido. Puede ser considerada como una solución intermedia entre una playa por alimentación artificial y una protección de enrocado.

El nombre “*revestimiento dinámico*” refleja precisamente esta transición, puesto que al consistir de grava y canto rodado, se espera que el material que la compone sea movido por las olas y corrientes costeras, en contraste con un revestimiento “*estático*” de enrocado (u otros materiales), que es diseñado para que no se mueva bajo la acción de la olas extremas.

El objetivo es construir la berma de grava de modo que su geometría y composición sea lo más parecida a la de la playa natural, de manera de resultar compatible con el entorno natural y asegurando su estabilidad al responder a los procesos marinos como una playa de grava natural.

Siendo una estructura dinámica, resulta efectiva en la defensa costera porque el talud empinado y poroso es capaz de disipar la energía del oleaje aún bajo tormentas severas.

Entre las ventajas de este tipo de estructura se puede mencionar el menor tamaño de material requerido respecto de un revestimiento rígido. Tampoco su colocación requiere de cuidados especiales por lo que su construcción resulta muy simple. Aunque para la construcción pueden ser necesarios mayores volúmenes respecto de una estructura rígida convencional, su costo es en general menor.

Otro factor importante a favor de la berma de grava es su apariencia, que la hace indistinguible del entorno natural.

Puesto que las gravas y canto rodado pueden ser movilizados por las olas, el material colocado puede ser transportado a lo largo de la costa o arrastrado hacia el mar por olas extremas, algún mantenimiento puede ser necesario para este tipo de solución. Otro inconveniente es que la grava y canto rodado puede ser arrojado por la acción de olas intensas, hacia propiedades próximas.

Las *actuaciones duras* son aquellas que conllevan una estructura resistente. Se clasifican en obras longitudinales y obras transversales a la línea de costa.

También se encuentran en este último grupo de obras los diques exentos, que son aquellas estructuras exteriores a la línea de costa, generalmente paralelas a ella, dentro del mar.

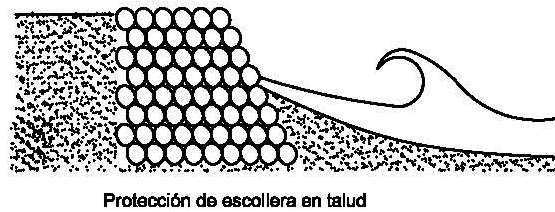
En el caso de Playa Magagna, el retroceso obedece básicamente a la llegada de olas altas en correspondencia con niveles extraordinarios del mar, lo que degrada la base del acantilado por tratarse de una roca sedimentaria blanda. Las lluvias y el drenaje por sobre el borde del acantilado también contribuyen a su degradación. Por tal motivo, las obras que se proyecten deberán estar acompañadas de aquéllas necesarias para el control de la erosión pluvial, y cuyo planteo y dimensionamiento están fuera del alcance de este estudio.

Acorde con lo indicado, la obra que se propone es de tipo longitudinal, con el propósito de reforzar este punto vulnerable del perfil a la acción marina.

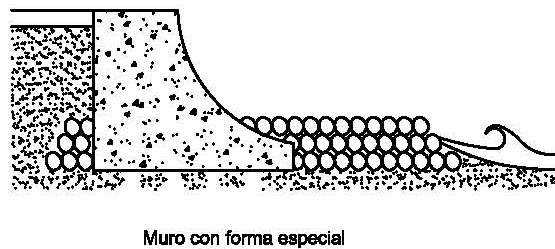
La estructura puede ser artificial o natural. En éste último caso, materializada mediante la construcción de una berma o relleno de materiales granulares, contenido entre espigones perpendiculares a la línea de costa.

Existen numerosas formas de materializar una obra longitudinal, ya sea mediante terraplenes protegidos por bloques de hormigón prefabricados, taludes de enrocado, muros de hormigón de variadas geometrías, tablestacados, o algunas soluciones

combinadas. Algunas variantes de protección longitudinal se observan en las **Figuras 9.1** y **9.2**. La elección de uno u otro diseño dependerá de las condiciones técnicas y económicas del área donde se ejecutará el proyecto.



**Figura 9.1**

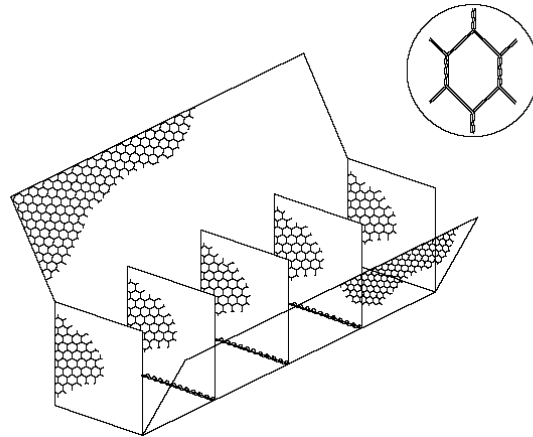


**Figura 9.2**

Una alternativa interesante son los muros construidos mediante gaviones rellenos con materiales de granulometría adecuada. La disponibilidad en abundancia en el área costera de Playa Magagna de gravas gruesas y cantos rodados señala a esta variante como una alternativa viable desde el punto de vista económico, presentando además una suma de consideraciones positivas en la evaluación de los aspectos ambientales.

El gavión caja es una estructura metálica, en forma de paralelepípedo, cuyas tres dimensiones son de la misma magnitud. Un único elemento, producido con malla hexagonal de doble torsión, forma la base, la tapa y las paredes laterales. Al elemento de base son unidas, durante la fabricación, las dos paredes de extremidad y los diafragmas.

Debidamente desdoblado en obra y ensamblado, asume la forma de un paralelepípedo **Figura 9.3**.



**Figura 9.3.** Esquema de Gavión caja

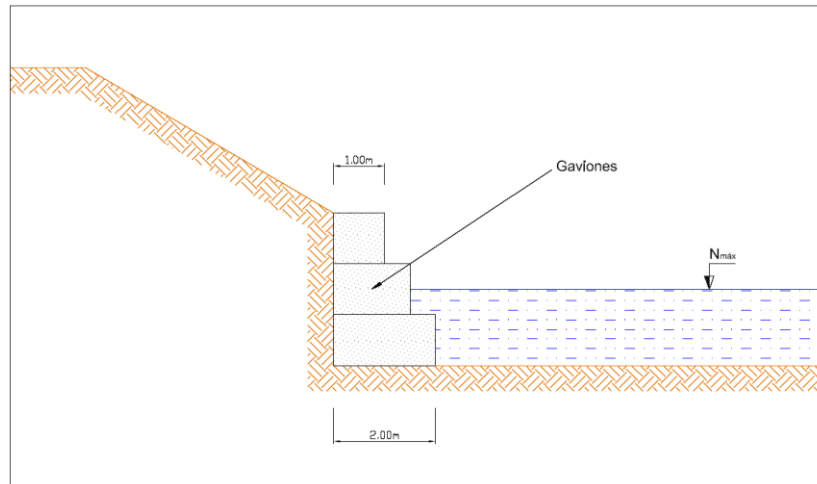
Las dimensiones de los gaviones caja son estandarizadas. El largo, siempre múltiplo de 1 m, varía de 1m a 6 m, con la excepción del gavión de 1,5m, mientras que el ancho es siempre de 1m. La altura puede ser de 0,50 o 1,00m.

Las protecciones construidas con gaviones, son obras verticales que resisten por gravedad, por tanto resultan de vital importancia el tipo de cimentación y la protección del pie, de modo tal que se minimicen los asentos e impida el socavamiento del muro.

En caso de presentar una cimentación segura el esquema de obra recomendado<sup>12</sup> para obras con gaviones es el indicado en la **Figura 9.4.**

---

<sup>12</sup> Strutture flessibili in gabbioni e materassi Reno nelle aste torrentizie e fluviali – Officine Maccaferri S.p.A. Bologna, Italia, 1988.



**Figura 9.4.** Obra de defensa con fundación directa

En protecciones costeras con gaviones el parámetro principal en el proyecto contra la erosión causada por las olas es la altura de las mismas.

Cabe destacar, que el diseño y cálculo de obras con gaviones sometidos al oleaje no ha sido desarrollado ampliamente para protecciones costeras, en cambio en protecciones de márgenes de ríos sí existen muchos antecedentes de campo y de laboratorio. Esto hace que la capacidad de predicción y cálculo de este tipo de obras sometidas al oleaje sea limitado.

C.T. Brown<sup>13</sup> realizó una investigación de laboratorio sobre el uso de los gaviones caja para protecciones de costas marítimas y de grande lagos y encontró que para gaviones de 0.50m de altura, la altura de ola máxima admisible es 1m. Se estima que para gaviones de 1m de espesor la altura de ola admisible es del orden de 2m.

<sup>13</sup> C. T. BROWN, Gabion Report on some factors affecting the use of Maccaferri gabions and Reno mattresses for coastal revetments, Manly Vale, N. S. W., 1979.

Es conveniente indicar que en las pruebas no fueron estudiados los efectos provocados por el movimiento de las piedras dentro de los gaviones caja. El movimiento de las piedras contenidas dentro de las estructuras metálicas puede desgastar el revestimiento de los alambres y consecuentemente disminuir su vida útil.

En el curso de la ejecución del presente estudio, de común acuerdo con la DGIP, se avanzó tanto en el desarrollo de un tipo de obra longitudinal de gaviones (obra rígida), acorde con las ventajas técnicas, económicas y ambientales que ofrece frente a otras posibilidades, como también en una solución de obra flexible, de tipo berma sostenida mediante la construcción de un espigón.

## 9.2 Aspectos generales de proyecto

Los parámetros de diseño resultan condicionados por las acciones que deben soportar la obra (aspectos estructurales) y el objetivo que se requiere de ella (consideraciones funcionales). Estos aspectos pueden resumirse en cuatro:

- a) Localización y dimensiones de la obra
- b) Cota de coronamiento
- c) Tipo de fondo donde se asentará
- d) Aspectos técnico-económicos y ambientales

**a)** La localización y dimensiones de la obra adoptadas dependen de las zonas de mayor riesgo, acorde con la zonificación propuesta en el **Capítulo 8**. Como se mencionara en ese capítulo, en algunos sectores de la franja costera de playa Magagna, las sobreelevaciones del nivel del mar unidas a un gran temporal afectan directamente al pie de la barrancas, aumentando el riesgo de erosión de las tierras en su trasdós. A este fenómeno se suma la erosión localizada por los excesos pluviales sobre suelos con baja resistencia mecánica, los que deberán ser captados por obras de drenaje capaces de colectar y escurrir en forma controlada hacia el mar los caudales generados en los sectores urbanizados.

En el sector sur de playa Cangrejales (Tramo 5) ya se ha construido una protección longitudinal que responde a los criterios generales desarrollados en el presente estudio. La obra se halla compuesta por gaviones, dándole rigidez a la línea de costa sobre un frente de 340m de desarrollo y permitiendo la continuidad física y estética a la playa (**Figura 9.3**).



**Figura 9.3: Protección longitudinal compuesta por gaviones en Playa Cangrejales realizada por la DGIP**

Para el Tramo 2 es posible plantear una solución equivalente, sobre un frente costero de 900 m de extensión entre los perfiles 6 y 9.

b) Para determinar la cota de coronamiento de la obra, debe evaluarse el máximo caudal de sobrepaso permitido, de manera de asegurar la estabilidad de los terrenos ubicados detrás de la obra de defensa, ya sea desde el punto de vista del compromiso estructural que pueda conllevar un sobrepaso excesivo, como también desde el punto de vista funcional en lo que se refiere a control de inundación en áreas urbanas. Para ello existen diversas formulaciones que permiten estimar el caudal de sobrepaso por olas según las condiciones del medio (nivel del mar, altura y período de las olas al pie de la estructura) y la cota de coronamiento adoptada.

c) En el caso de Playa Magagna es posible aprovechar la ventaja que ofrece el tipo de base de apoyo rígido provisto por el afloramiento rocoso (restinga), lo que minimiza los asentamientos, asegurando la cota de coronamiento de la obra, al mismo tiempo que brinda protección del pie de la estructura frente al socavamiento por la acción marina. Se recomienda entonces que la obra de defensa se apoye sobre este manto rocoso, el que presenta una cota variable a lo largo de toda la costa, aproximadamente entre +3.0m y +4.0m MOP.

d) Tanto en el caso de la solución de gaviones como de la berma de gravas, ambas presentan algunas ventajas como las que se indican a continuación:

- Son de fácil construcción y relativo bajo coste, aunque en el caso de los gaviones, su baja resistencia por la degradación de las mallas metálicas, son sólo aconsejables en zonas de baja violencia marina.
- Su construcción es simple y el equipamiento y maquinaria requerido para su construcción e instalación es mínimo.
- El material de relleno se halla disponible en abundancia en el área, lo que reduce costos de transporte, y asegura menor impacto ambiental en etapa constructiva (ruido, emisiones).
- No se requiere un obrador, sino únicamente algún espacio para acopio del material a colocar. Tampoco implica consumo de agua ni electricidad. La mano de obra es mínima.
- La utilización de materiales naturales de la zona hacen que se satisfagan los aspectos estéticos, visual y paisajístico.

### 9.3 Parámetros hidráulicos de proyecto

Los principales parámetros hidráulicos utilizados para la verificación estructural y funcional de la obra longitudinal de protección fueron:

#### Nivel del mar:

Para la determinación de este parámetro se consideraron los siguientes efectos: la marea astronómica + sobreelevación por viento + sobreelevación por calentamiento global.

**Marea astronómica:** El valor de diseño utilizado en condición extrema es:

**Pleamar máxima** = 3.59m MOP

**Marea meteorológica:** es la inducida principalmente por la variación de presión en gran escala y por efecto de viento soplando hacia áreas costeras. Se aceptan valores de 1 m con un período de retorno de 50 años.

**Consideraciones sobre el Calentamiento Global:** se adopta como sobreelevación por calentamiento global el valor de 0,05 m.

Bajo estas consideraciones el **nivel de mar de proyecto** resulta:

$$NM_{\max} = 3.59\text{m} + 1,00\text{ m} + 0.05\text{ m} = +4.64\text{ m. (MOP)}$$

#### Altura de ola de diseño:

La información necesaria para evaluar el sobrepaso frente a la acción de temporales sobre la playa se obtuvo del modelo Bouss-2D, a partir de una serie cronológica de 10 años con datos cada tres horas, generados por un Modelo Global y de una modelación intermedia (SWAN).

El resumen de los valores utilizados en el cálculo es presentado en la siguiente **Tabla 9.1**, donde se incluyen los parámetros del oleaje en una zona exterior correspondientes a la línea batimétrica de -12 m: Hs, Tp, Lo; y los parámetros del oleaje propagado hasta el pie del acantilado para un nivel de marea de N=3.59 m, estos son: Hb (altura de rotura del oleaje) y hb (profundidad de rotura).

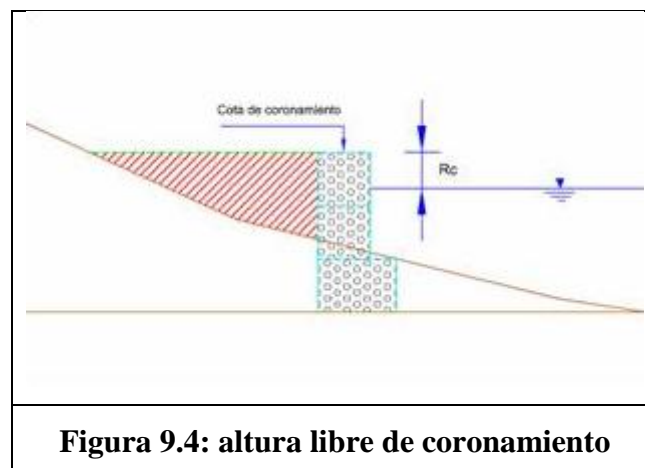
**Tabla 9.1** Altura de ola de diseño

perfiles	Hs (m)	T <sub>p</sub> (seg)	Lo (m)	H <sub>b</sub> (m)	h <sub>b</sub> (m)
perfil 5	2	6	56.21	0.93	2.12
	2.5	7	76.50	1.77	2.12
	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>99.92</b>	<b>1.95</b>	<b>2.12</b>
	3.5	9	126.47	1.24	2.12
	1.5	15	351.29	1.42	2.12
	2	15	351.29	1.52	2.12
	2.5	15	351.29	1.50	2.12
perfil 10	2	6	56.21	1.23	2.74
	2.5	7	76.50	1.69	2.74
	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>99.92</b>	<b>1.91</b>	<b>2.74</b>
	3.5	9	126.47	1.23	2.74
	1.5	15	351.29	1.71	2.74
	2	15	351.29	1.72	2.74
	2.5	15	351.29	1.63	2.74
perfil 18	2	6	56.21	1.16	2.57
	<b>2.5</b>	<b>7</b>	<b>76.50</b>	<b>2.26</b>	<b>2.57</b>
	3	8	99.92	1.50	2.57
	3.5	9	126.47	1.40	2.57
	1.5	15	351.29	1.83	2.57
	2	15	351.29	1.98	2.57
	2.5	15	351.29	1.74	2.57
perfil 21	2	6	56.21	2.25	2.57
	2.5	7	76.50	2.09	2.57
	3	8	99.92	1.53	2.57
	3.5	9	126.47	1.37	2.57
	1.5	15	351.29	1.80	2.57
	2	15	351.29	1.92	2.57
	2.5	15	351.29	1.88	2.57
perfil 24	2	6	56.21	1.71	1.95
	2.5	7	76.50	1.81	1.95
	3	8	99.92	1.24	1.95
	3.5	9	126.47	1.24	1.95
	1.5	15	351.29	1.75	1.95
	2	15	351.29	1.76	1.95
	2.5	15	351.29	1.80	1.95

Caudal medio de sobrepaso admisible:

El sobrepaso  $q$  es el *caudal medio por metro lineal de ancho de obra* que pasa por encima del coronamiento de una obra cuando una ola impacta sobre la estructura. Las unidades para su cuantificación pueden ser por ejemplo “ $m^3/s/m$ ” ó “ $l/s/m$ ”.

El sobrepaso de una ola sucede cuando el nivel de coronamiento es menor que el nivel de run-up (trepada) de la ola. El parámetro que debe entonces ser usado es la altura libre de coronamiento  $R_c$  (**Figura 9.4**). Esta altura corresponde a la diferencia de altura entre el nivel de aguas quietas y el nivel de coronamiento.



**Figura 9.4: altura libre de coronamiento**

El sobrepaso tiene en cuenta principalmente la relación de la altura de la línea de coronamiento externo y se asume que este sobrepaso también afecta el talud interno.

En realidad no hay una descarga constante sobre el coronamiento de la defensa durante el sobrepaso. Las olas más grandes pueden arrojar una gran cantidad de agua en un corto período de tiempo. Olas más pequeñas no producirán ningún sobrepaso, así también puede calcularse el volumen de sobrepaso por cada ola. El caudal medio  $q$  es entonces indicativo de los volúmenes de agua por unidad de tiempo en un lapso más o menos prolongado pero los volúmenes instantáneos de sobrepaso debido a una ola extrema individual pueden ser considerablemente mayores.

El *caudal de sobrepaso admisible* para una obra de protección longitudinal depende de los siguientes factores:

- Estabilidad del coronamiento y la cara de la estructura expuesta a la acción directa del oleaje.
- Capacidad de sistema de drenaje en el área protegida.
- Posibilidad de daño a edificios, equipos e instalaciones situadas al abrigo de la estructura.
- Posibilidad de daño a personas.

Algunos de estos factores, como lo es la capacidad de drenaje, relacionada con la posibilidad de inundación, dependen del caudal medio de sobrepaso durante períodos de tiempo elevados, que dependen del área inundada, mientras que otros factores como puede ser la posibilidad de arrastre a vehículos, personas depende de caudales instantáneos generados por olas individuales.

En la **Tabla 9.2** se dan rangos de valores del sobrepaso medio tolerable para diferentes escenarios de riesgo y elementos afectados.

El caudal de sobrepaso límite adoptado debe ser compatible con los potenciales daños materiales que podrían generarse en caso de no limitarse dicho parámetro. En este sentido la franja costera en estudio presenta baja densidad de estructuras urbanas, pero con un proceso de erosión que afecta las barrancas que enmarcan la playa, por lo tanto, afectan la defensa natural que lo protegía del mar.

Dada las características del material que compone las barrancas, un caudal de sobrepaso excesivo afectaría directamente la estabilidad de la zona interior de la obra y por consiguiente la estabilidad de la protección.

**Tabla 9.2:** Caudal medio de sobrepaso admisible (Fuente: CEM 2001)

$q$ m <sup>3</sup> /s por metro		$q$ litros/s por metro			
SEGURIDAD FUNCIONAL		SEGURIDAD ESTRUCTURAL			
VEHICULOS	PEATONES	EDIFICIOS	MURO COSTERO	DEFENSA COSTERA REVESTIDA	
$10^0$	<i>inseguro a cualquier velocidad</i>	<i>daño estructural</i>	<i>daño con protección total</i>	<i>daño en calzada pavimentada</i>	1000
				<i>daño en calzada no pavimentada</i>	200
				<i>daño en talud interno no protegido</i>	100
				<i>daño en coronamiento no protegido</i>	50
				<i>daño en talud interno no protegido</i>	20
				<i>daño en coronamiento no protegido</i>	10
				<i>sin daño</i>	2
				<i>sin daño</i>	1
				<i>sin daño</i>	0.1
				<i>sin daño</i>	0.03
$10^{-1}$	<i>muy peligroso</i>	<i>daño menor</i>	<i>sin daño</i>	<i>sin daño</i>	10
$10^{-2}$	<i>dique verde y componente horizontal peligroso</i>				5
$10^{-3}$	<i>pared vertical peligroso</i>				1
$10^{-4}$	<i>comp. horiz. inseguro para estacionar</i>				0.1
$10^{-5}$	<i>pared vertical inseguro para estacionar</i>				0.03
$10^{-6}$	<i>incomodo pero no peligroso</i>				0.02
$10^{-7}$	<i>inseguro para velocidad alta</i>				0.01
$10^{-8}$	<i>inseguro para toda velocidad</i>				0.004
$10^{-9}$	<i>mojado, pero no incomodo</i>				0.001
$10^{-10}$	<i>sin daño</i>				0.0001

En base a los criterios señalados anteriormente el caudal de sobrepaso admisible se fijó en 20 litros/s/m, valor a partir del cual la **Tabla 9.2** indica el desarrollo de daño en el talud interno.

## 10 PREDIMENSIONADO

### 10.1 Muro longitudinal de gaviones

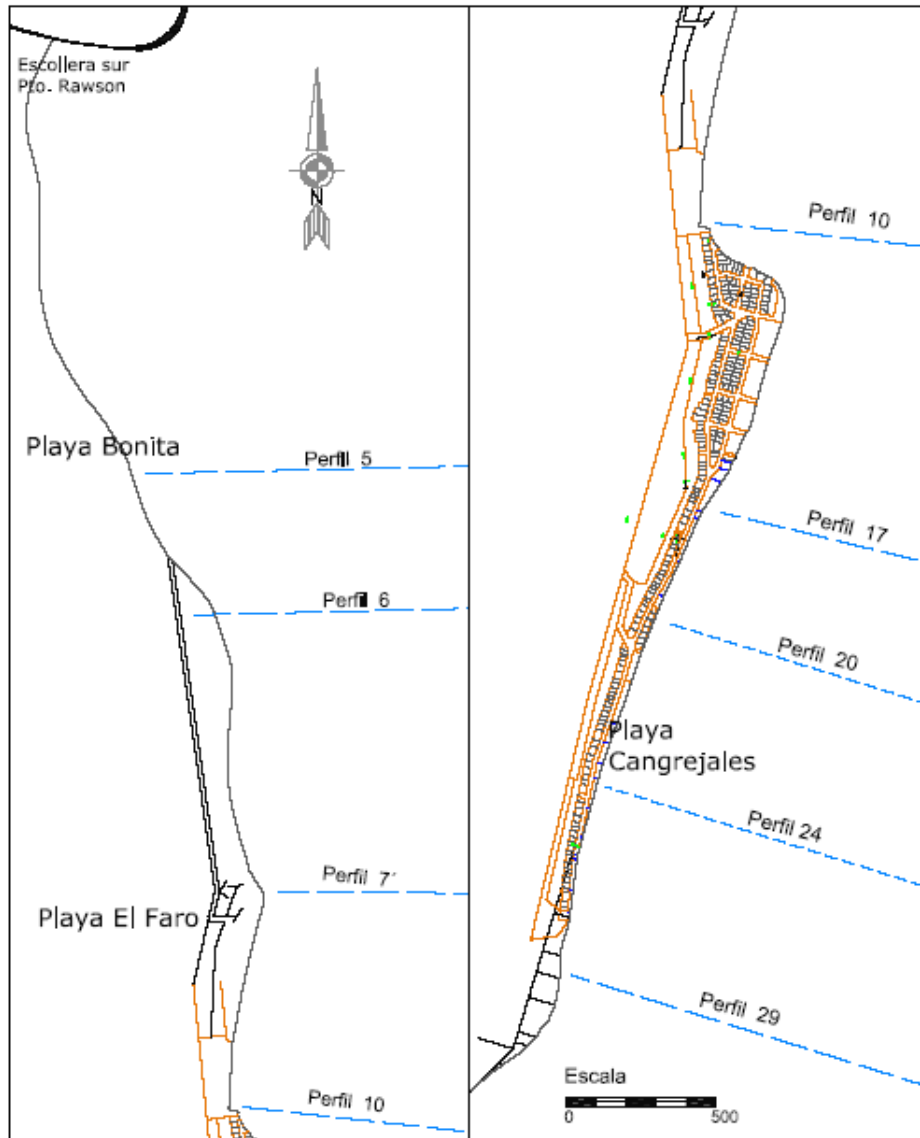
La cota superior para cada tramo de obra debe ser definida en función del caudal medio de sobrepaso, de modo tal que para la condición de diseño no se supere el valor crítico o admisible.

#### *10.1.1 Cálculo de sobrepaso*

Siguiendo el criterio definido en el **Capítulo 8** (Diagnóstico de situación y Zonificación), la franja costera de Playa Magagna fue dividida en cinco tramos. Para los sectores más afectados por la erosión (Tramos 2 y 5), en los cuales se requiere con mayor urgencia la construcción de una obra de defensa longitudinal, se calcularon los niveles de sobrepaso correspondientes.

Dadas las características y la extensión de cada tramo costero, y teniendo en cuenta la extensión de las obras construidas o proyectadas, el cálculo se desarrolló para los sectores comprendidos entre los siguientes límites (ver **Figura 10.1**):

- Entre los perfiles 5 y 7´
- Entre los perfiles 7´ y 10
- Entre los perfiles 17 y 20
- Entre los perfiles 20 y 24
- Entre los perfiles 24 y 29



**Figura 10.1: Zonas de cálculo de sobrepaso**

El caudal de sobrepaso se evaluó con la fórmula de Franco y Franco (1999) (CEM VI-5-30) que considera muros verticales con y sin perforaciones en su parte frontal:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_s^3}} = 0.082 \cdot \exp\left(-3.0 \cdot \frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma_\beta \gamma_s}\right) \quad (\text{ec. 10.1})$$

Donde  $q$  es el caudal medio de sobrepaso por unidad de longitud de muro, en  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ,  $R_c$  es la altura del coronamiento del muro respecto del nivel estático de agua y  $H_s$  la altura

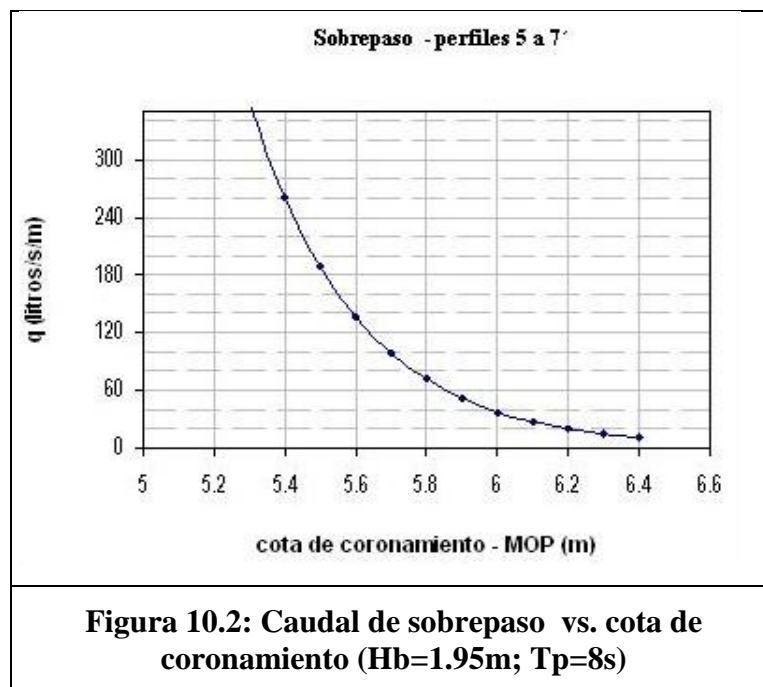
de ola significativa. Los coeficientes  $\gamma_\beta$  y  $\gamma_s$  tienen en cuenta el ángulo de llegada de las olas y el tipo de superficie y geometría del frente del muro de protección.

El parámetro  $\gamma_\beta$  puede adoptar dos valores distintos según sean olas oceánicas o locales (1 y 0.83 respectivamente para una incidencia normal del oleaje). Para  $\gamma_s$  se adoptó el mínimo valor de 0.58 dada la porosidad de los gaviones.

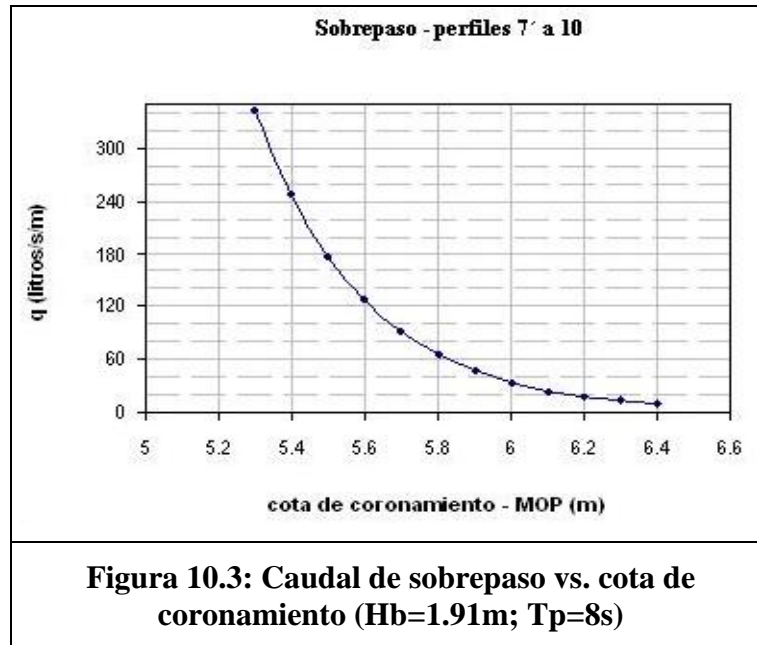
#### 10.1.2 Resultados:

En cada una de las zonas indicadas se adoptó un perfil representativo para el cálculo del sobrepaso. Luego se identificó el escenario más desfavorable en cada zona y a partir de allí se evaluó el sobrepaso para distintos valores de cota de coronamiento.

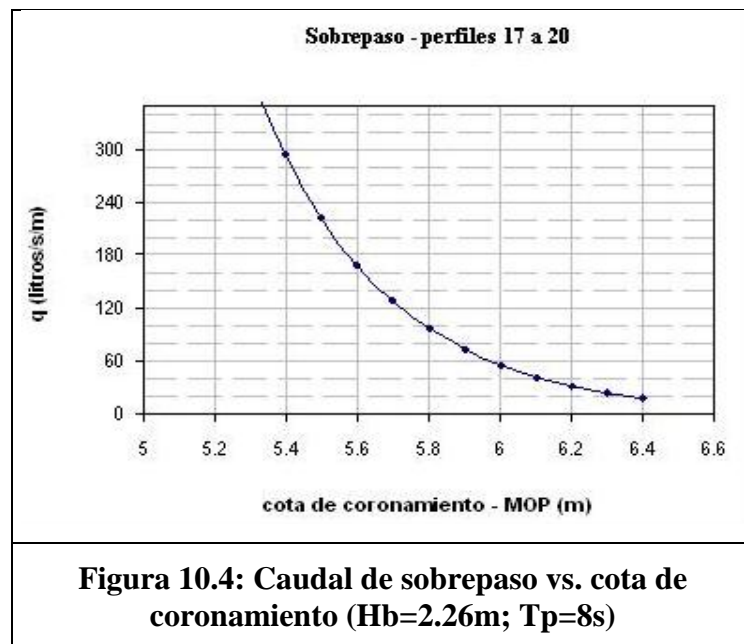
Perfiles 5 a 7': El escenario más desfavorable corresponde a  $H_s = 3\text{m}$  y  $T_p = 8\text{s}$ . Teniendo en cuenta la condición de caudal de sobrepaso admisible  $q = 20\text{litros/s/m}$ , la cota de coronamiento necesaria es  $+6.20\text{m MOP}$ .



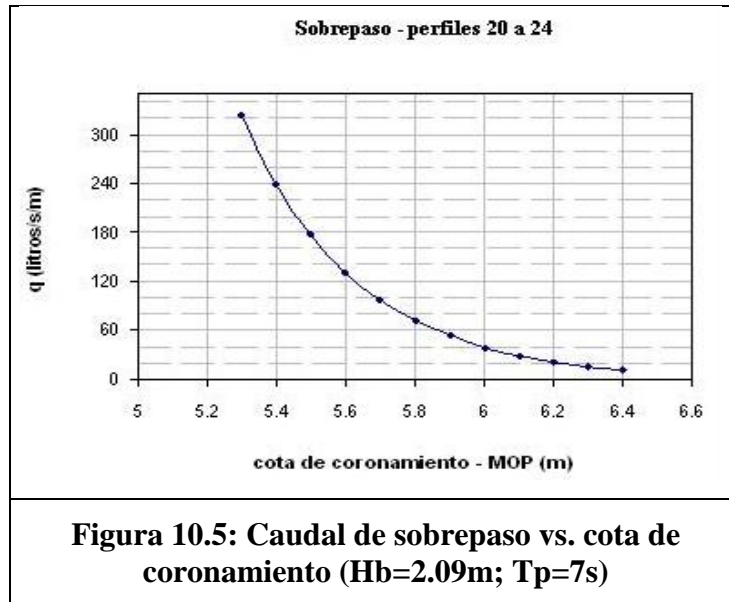
Perfiles 7' a 10: El escenario más desfavorable corresponde a  $H_s = 3\text{m}$  y  $T_p = 8\text{s}$  y la cota de coronamiento necesaria es  $+6.20\text{m MOP}$ .



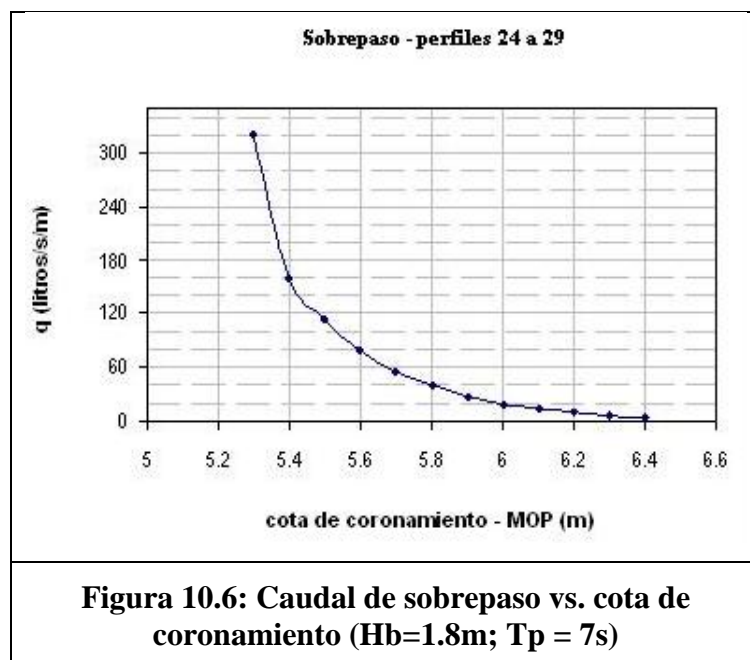
Perfiles 17 a 20: El escenario más desfavorable corresponde a  $H_s=2.5\text{m}$  y  $T_p=7\text{s}$  y la cota de coronamiento necesaria es  $+6.40\text{m MOP}$ .



Perfiles 20 a 24: El escenario más desfavorable corresponde a  $H_s=2.5\text{m}$  y  $T_p=7\text{s}$  y la cota de coronamiento necesaria es  $+6.20\text{m MOP}$ .



Perfiles 24 a 29: El escenario más desfavorable corresponde a  $H_s=2.5\text{m}$  y  $T_p=7\text{s}$  y la cota de coronamiento necesaria es  $+6.00\text{m MOP}$ .



La siguiente tabla sintetiza los resultados obtenidos en esta aplicación:

**Tabla 10.1. Síntesis de resultados**

Entre los perfiles	Cota (MOP)
5 y 7'	+6.20
7' y 10	+6.20
17 y 20	+6.40
20 y 24	+6.20
20 y 24	+6.00

## 10.2 Relleno de playa contenido por espigones

Los resultados obtenidos en el **Capítulo 6** para la aplicación del Método de convolución indicaron que la erosión potencial del acantilado se reduce fuertemente si se desarrolla una berma de material granular delante de él.

Los principales elementos de diseño para una obra de este tipo son la pendiente y la cota superior de la berma requerida para minimizar el run-up y sobrepaso. La metodología utilizada consistió en diseñar la berma dinámica con la pendiente de las playas naturales de grava del entorno, mediante un análisis de los perfiles relevados. La cota superior tuvo en cuenta el nivel del mar debido a las mareas astronómicas y al efecto meteorológico, a lo que se sumó el run-up sobre la berma, evaluado a partir de algunas determinaciones experimentales. El material para construir la berma será el disponible en el área<sup>14</sup>.

Este tipo de solución requiere la construcción de espigones transversales, cuya función principal es la de actuar como barreras al transporte litoral, impidiendo la remoción del

---

<sup>14</sup> *A Dynamic Revetment and Artificial Dune for Shore Protection*. J.C. Allan, Paul Komar. 28th Coastal Engineering Conference, 2002, pp 2044.

material de relleno y captando parte del material que es transportado de forma natural por el oleaje.

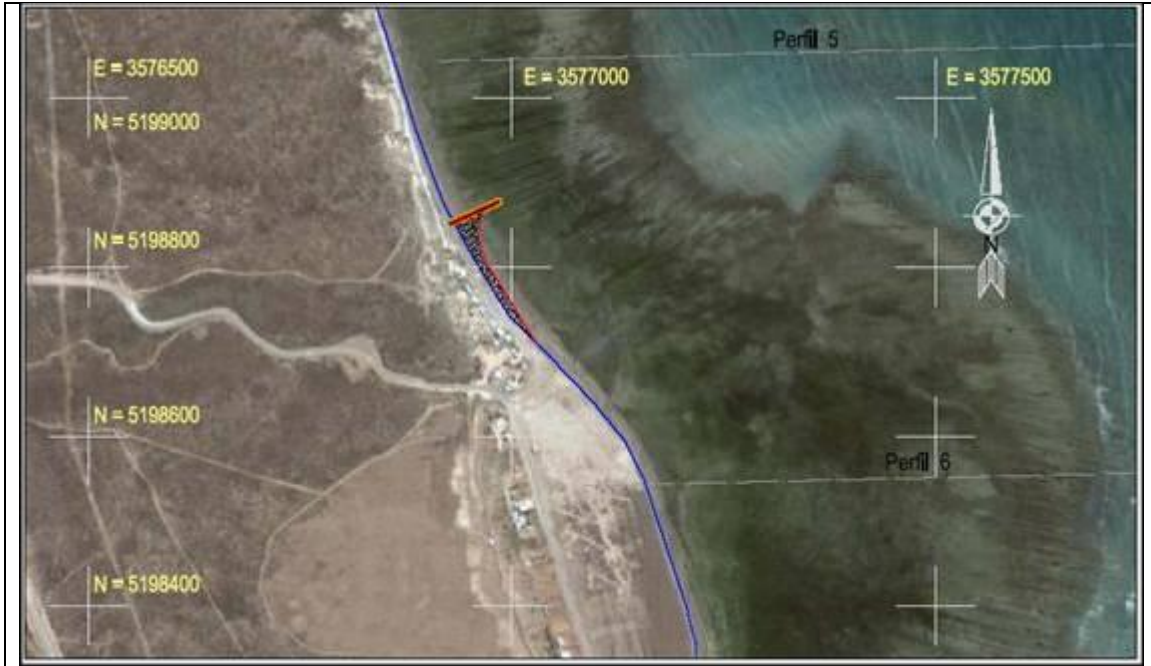
Los espigones pueden ser de una variedad de geometrías y composiciones: en talud o verticales, multicapa o monocapa. Los espigones verticales pueden ser resistentes por gravedad o hincados en el suelo. A su vez, los espigones de gravedad se clasifican según el tipo de material utilizado para su construcción: espigones de hormigón, de madera o gaviones.

Los espigones de gaviones son de fácil construcción y relativo bajo coste, aunque su baja resistencia por la degradación de las mallas metálicas, son solo aconsejables en zonas de baja violencia marina. Dada la abundancia de gravas y la escasez de piedra de gran tamaño en la zona, ésta puede ser una alternativa válida para el caso de Playa Magagna.

#### *10.2.1 Generación de la playa de grava*

En base a lo observado en el **Capítulo 8** (Diagnóstico y Zonificación) y atendiendo a las necesidades más urgentes desde el punto de vista de la conservación de la infraestructura existente, en este informe se propone la ejecución de una defensa costera consistente en la creación de una playa de gravas para el Tramo 2 de la costa, el cual se encuentra ubicado en el extremo norte de Playa Bonita y presenta un estado muy avanzado en la degradación del acantilado que pone en riesgo la estabilidad de algunas viviendas particulares.

Para poder contener el material de relleno de la playa se propone la construcción de un espigón orientado en dirección perpendicular a la línea de costa, ubicado entre los Perfiles 5 y 6 del relevamiento, a una distancia de 200 m del primero, tal como se observa en la **Figura 10.7**



**Figura 10.7. Ubicación de la playa proyectada – Coordenadas Gauss Kruger WTS84**

Puesto que, como se determinó en el **Capítulo 7**, el transporte litoral neto para ese sector de la costa tiene dirección Sur-Norte y es del orden de  $Q_{LS} = 11.000 \text{ m}^3/\text{año}$ , es de esperar que en caso de existir disponibilidad de material, el mismo sea transportado por el oleaje y contenido en gran parte por esta estructura, permitiendo así el desarrollo de la playa.

El espigón propuesto en este esquema tiene una longitud aproximada de 60 m. La forma en planta de la playa se ha aproximado aplicando la teoría de la espiral logarítmica (Silvester 1960, 1976)<sup>15</sup> apoyada sobre el polo de difracción constituido por el extremo del espigón.

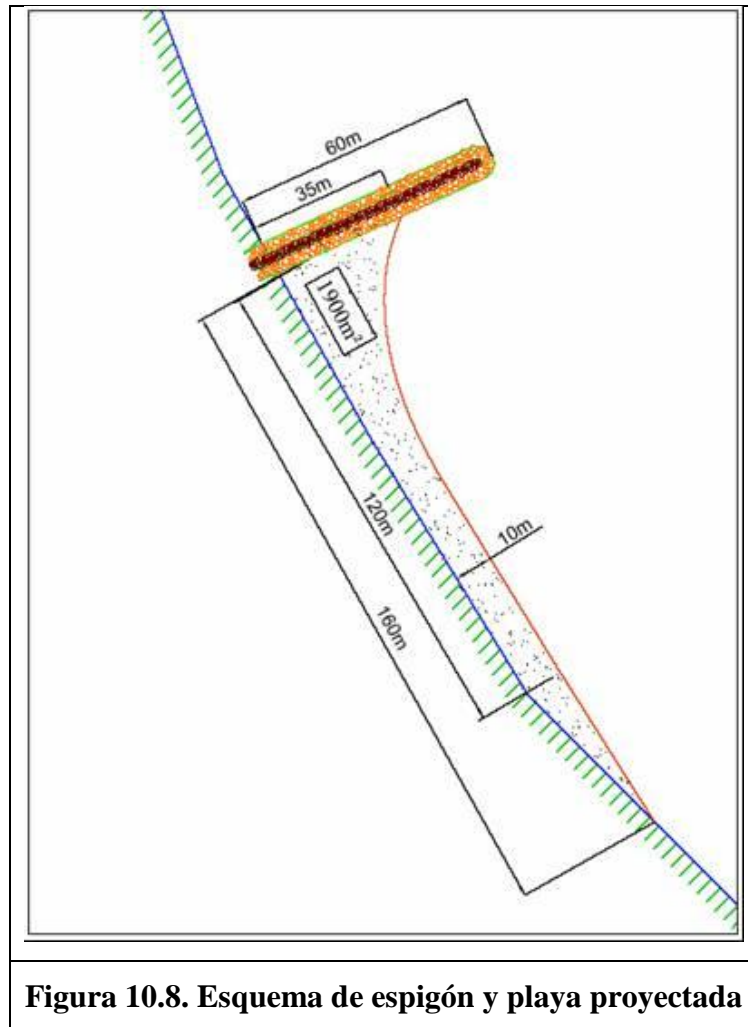
Esta configuración de playa representa una situación final de equilibrio en función de la capacidad que tendría dicha estructura para sostener un perfil de material de relleno,

<sup>15</sup> Silvester, R. (1960) Stabilization of sedimentary coastlines. *Nature*, 188:467-469.

Silvester, R. (1976) Headland defense of coasts. *Proc., 15 th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, 1394-1406.

para el cual se ha considerado el desarrollo de un talud con las mismas características que tiene el perfil relevado en ese sector de la playa.

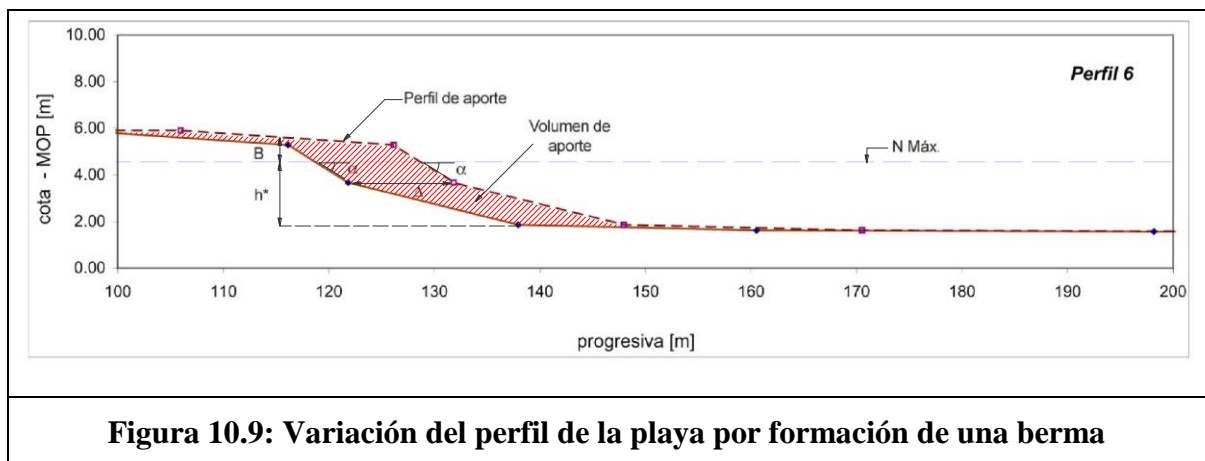
La **Figura 10.8** muestra un esquema en detalle de playa generada por el avance de la línea de costa a partir de la construcción del espigón.



En el esquema planteado se observa que la modificación de la línea de costa se prolonga hasta una distancia de 160 m desde el espigón, existiendo un tramo del orden 120 m donde el ancho de la berma generada supera los 10 m, lo cual, como se vio en el **Capítulo 6**, constituye una importante defensa para el acantilado frente acción del

oleaje. El área costera recuperada de esta manera tendría una superficie del orden de  $1900 \text{ m}^2$ , y el volumen de material acumulado rondaría los  $8200 \text{ m}^3$ .

Dado que el proceso de acumulación dependerá fundamentalmente de la cantidad de material que efectivamente se encuentre disponible para el transporte en la zona, se realizó un cálculo del volumen de grava necesario para generar la berma inicial que brinde protección al acantilado. La **Figura 10.9** muestra el esquema del perfil actual de la playa junto con el relleno ejecutado para asegurar una berma de 10 m de ancho.



A partir de este esquema se estimó el volumen de material necesario para efectuar el relleno, utilizando la siguiente expresión:

$$V[m^3 / m] = (B + h^*) \cdot \Delta \quad (10.2)$$

donde,

$B$  = altura de diseño de la berma

$\Delta$  = ancho de diseño de la playa

$h^*$  = profundidad de cierre

El resultado de este cómputo determinó que se requieren  $34 \text{ m}^3$  de grava por metro lineal de costa.

La cota superior de la berma artificial está definida a partir del máximo run-up (trepada) de la ola de diseño. El run up es la distancia vertical que alcanza la ola respecto del nivel de agua en reposo. La máxima elevación y su recorrido horizontal sobre la playa tienen una particular importancia en los procesos erosivos que se desarrollan en esta parte más alta de la playa. El run-up<sup>16</sup> sobre una playa, constituye el último suceso en la disipación de la energía de las olas en su propagación hacia la costa, a lo largo de la cual se ha disipado energía por rotura y fricción del fondo.

El run up se compone de tres elementos básicos: (a) el set up por oleaje, es decir la sobreelevación del nivel medio del agua en la zona de rompiente por la presencia de las olas. (b) la fluctuación sobre este nivel debido a la llegada de olas individuales. (c) componentes de largo período en la oscilación debido a ondas largas (infragravity waves), las que pueden ser substancialmente mayores que 20 segundos.

El run up total es la suma de estos tres componentes. Debido a su naturaleza el run up es descrito como un valor estadístico: run up significativo ( $R_s$ ), el run up que tiene la probabilidad de ser superado igual al 2% ( $R_{2\%}$ ) o el run up máximo ( $R_{\max}$ ).

A partir de experiencias de laboratorio realizadas específicamente para playas de grava Powell<sup>17</sup> propone:

$$P(R) = \exp(-B.R^{2.2}) \quad \text{Ec. (10.3)}$$

siendo R el run-up referido al nivel estático del agua, P la probabilidad de excedencia y

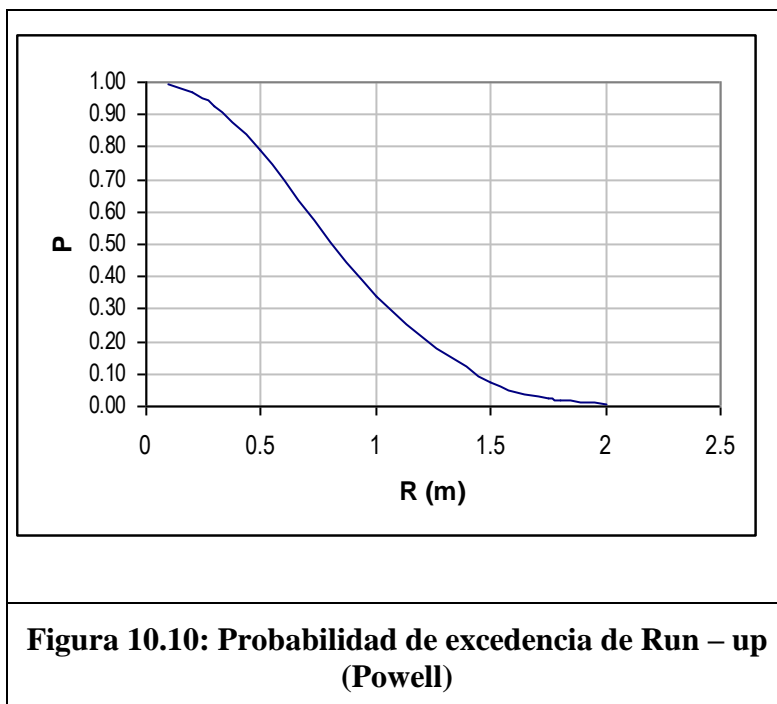
$$B = 0.3 \left[ H_s^{1.4} \exp\left(-30 \frac{H_s}{L_z}\right) \right]^{-1.6} \quad (10.4)$$

<sup>16</sup> *Beach Processes and the Erosion of Coastal Properties*. Paul Komar. Pacific Coasts and Ports '97. Christchurch, New Zealand, September 1997

<sup>17</sup> *The Dynamic Responder of Shingle Beaches to Random Waves*. Powell, K.A. 21<sup>st</sup> Coastal Engineering Conference, 1988, Chapter 130.

La aplicación de (10.4) en forma inversa permite determinar el valor de R y a partir de éste la cota de la berma para un valor preestablecido de P. Para  $P(R) = 2\%$  resulta  $R = 1.80$  m y Cota = 6.40. Si  $P(R) = 10\%$  resulta  $R = 1,42$  m y Cota = 6,0 m.

A la vista de estos resultados, se ha considerado razonable adoptar una cota de berma de + 6,0 m (MOP), la cual resulta prácticamente coincidente con la cota natural del terreno para ese tramo de la costa.



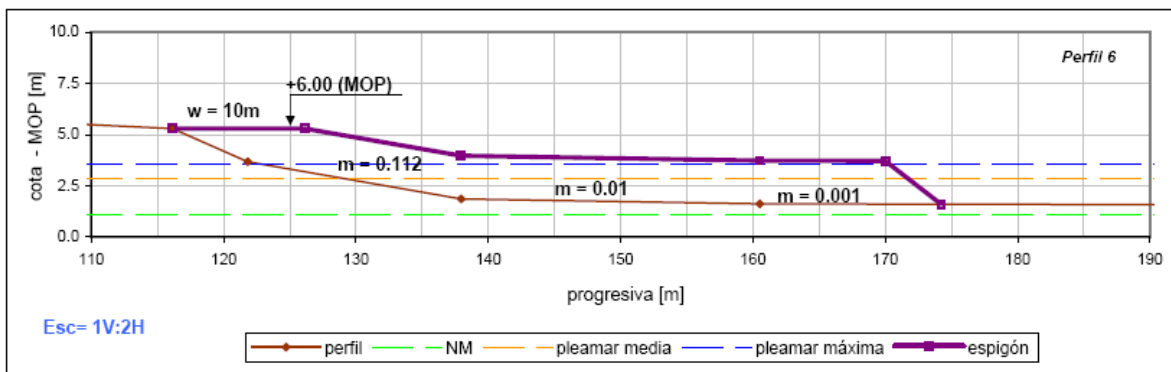
### 10.2.2 Geometría del espigón

Como se mencionó anteriormente, la función principal del espigón es la de dar contención lateral al relleno, permitiendo de esta manera, a expensas de la acumulación del material transportado por el oleaje, el avance del perfil de playa hasta una posición final de equilibrio.

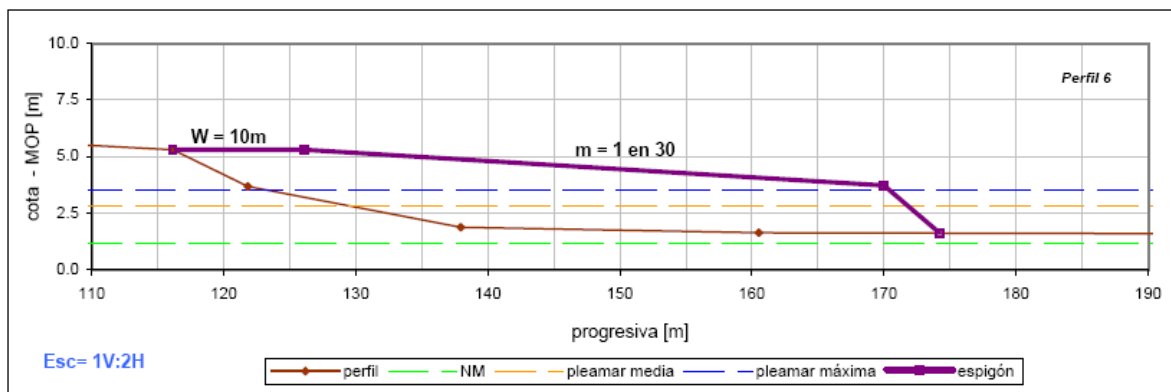
La elección de la longitud del espigón de  $L = 60$ m posibilita el avance de la línea de costa en una distancia máxima de 35 m, permitiendo además el desarrollo de un talud

del material granular que se extienda hasta el pie de la estructura con un ángulo de reposo equivalente al observado para el perfil actual.

La cota máxima del espigón deberá coincidir con la cota del terreno en el comienzo del perfil (N = +6 MOP). Luego se mantendrá constante, al menos, 10 m para permitir la formación de una berma que proteja el pie del acantilado. A partir de allí, y en función de la pendiente que quiera darse a la playa generada por acumulación de material, podrán proponerse diferentes variantes. Tal es el caso de las **Figuras 10.11 y 10.12**, donde se presentan un espigón que acompaña la pendiente natural del terreno y otro con una pendiente constante ( $m = 0.025$ ), respectivamente. En estas figuras se incorporaron tres niveles de marea que constituyen una referencia importante para el diseño



**Figura 10.11: Espigón con pendiente que acompaña la pendiente natural del terreno**



**Figura 10.12: Espigón con pendiente constante**

La altura máxima de la sección que surge de adoptar estos esquemas es de 1.50m y de 2.30m, respectivamente, lo que pone en evidencia el requerimiento de un volumen mayor para el segundo caso, aunque éste tendrá mayor capacidad para acumular material sobre la playa.

### 10.2.3 Diseño estructural del espigón

Para evaluar la estabilidad del enrocado existen diversas formulaciones. Entre ellas se puede citar a la extensamente utilizada fórmula de estabilidad de Hudson y las relaciones empíricas desarrolladas por van der Meer.

El modelo desarrollado por van der Meer tiene la ventaja de incorporar explícitamente otras variables respecto de la fórmula de Hudson. En estas expresiones se incorporan las características y duración de las olas que inciden sobre el talud, y la porosidad de la estructura.

Para incorporar las características del oleaje se utiliza el parámetro adimensional de Iribarren  $I_r$ :

$$I_r = \frac{S}{\sqrt{\frac{H_s}{L_o}}} \quad (10.5)$$

donde  $S$  es la pendiente de la playa,  $H_s$  la altura de ola y  $L_o$  la longitud de onda, ambos en aguas profundas.

El valor límite que separa los distintos tipos de rompiente (plunging/surging) se evalúa según:

$$I_{rl} = (6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha})^{1/(P+0.5)} \quad (10.6)$$

Para una protección de determinado talud  $\alpha$  y porosidad  $P$ , valores inferiores de  $I_{rl}$  al indicado por la ec. [10.6] corresponden al tipo de rotura "plunging" y valores mayores a

la denominada "surging". Para cada una de las cuales existe una fórmula de estabilidad diferente:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} * \sqrt{Ir} = 6.2 * P^{0.18} (S/\sqrt{N})^{0.2} \quad (\text{plunging, } Ir < |r|) \quad (10.7)$$

$$H_s/\Delta D_{n50} = 1.0 P^{0.13} (S/\sqrt{N})^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} Ir^P \quad (\text{surging } Ir > |r|) \quad (10.8)$$

donde :

$H_s$  = altura de ola significativa.

$Ir$  = parametro de Iribarren.

$T$  = periodo de cruce de ceros.

$\alpha$  = angulo del talud.

$\Delta$  = peso específico relativo del enrocado,  $\frac{\gamma_r - \gamma}{\gamma}$ .

$D_{n50}$  = diametro nominal,  $(\frac{W_{50}}{\gamma_r})^{1/3}$ .

$W_{50}$  = peso medio del enrocado.

$P$  = permeabilidad.

$S$  = nivel de daño,  $A/D_{n5}^2$

$A$  = area erosionada en la seccion transversal.

$N$  = numero de olas ( duracion de la tormenta ).

#### 10.2.4 Cálculo del tamaño y peso del bloque

Para el cálculo estructural se utilizaron ambas formulaciones. Las variables necesarias para el cálculo vinculadas a la caracterización del oleaje fueron proporcionadas por el modelo de propagación de oleaje Bouss-2D (ver **Parte 1 - Clima de Olas. Informe LHA 268-01-07**). El resto de los parámetros de cálculo adoptados fueron:

Talud:	$Cotg \alpha = 2$
Porosidad:	$P = 0.6$
Peso específico relativo:	$D = 1.65$
Duración:	$T_D = 2h$

S es el nivel de daño, número adimensional que expresa la relación entre el área transversal erosionada y área transversal de una unidad de enrocado. El valor de  $S = 2$  indica el inicio del daño. El valor máximo admisible es  $S = 8$ .

**Tabla 10.2: Rango de valores del nivel de daño S**

<i>Damage level by S for two – layer armor (van der Meer 1988)</i>				
<b>Unit</b>	<b>Slope</b>	<b>Initial damage</b>	<b>Intermediate damage</b>	<b>Failure</b>
Rock	1 : 1.5	2	3 – 5	8
Rock	1 : 2	2	4 – 6	8
Rock	1 : 3	2	6 – 9	12
Rock	1 : 4 – 1 : 6	3	8 – 12	17

Para este análisis se adoptó un valor de daño máximo admisible  $S = 5$ .

La porosidad  $P = 0.6$  corresponde a un espigón monocapa (un solo tipo de bloque y de tamaño, sin filtro ni núcleo)<sup>18</sup>

En función de los resultados obtenidos en la modelación del oleaje (Parte 1 del informe), para el cálculo de estabilidad se seleccionó un conjunto de escenarios conformado por eventos extremos de oleaje para el punto B de la modelación (batimétrica -12 m) con dirección de propagación SE, y escenarios con alturas de ola menores pero con dirección de propagación perpendicular a la costa (dirección E).

Los valores representativos de eventos extremos corresponden tanto a olas generadas por vientos locales como a olas oceánicas, y cada uno de ellos se encuentra asociado a un período de retorno determinado. Los escenarios con dirección de propagación E corresponde solamente a olas generadas por vientos locales y presentan alturas de olas en el punto B inferiores a los anteriores, pero ya se observó en el capítulo de modelación que en estos casos el oleaje que llega al pie del acantilado tiene mayor altura que el de los eventos extremos.

<sup>18</sup> Fundamentals of design. Coastal Engineering Manual. Chapter 5 – Part VI. 2001

La **Tabla 10.3** presenta el resumen de la información utilizada en esta aplicación junto con el resultado correspondiente al peso de bloque calculado con ambas expresiones. Los valores de  $H_o$ ,  $T$ , y  $T_R$  se encuentran asociados al oleaje en el ponto B; mientras que  $H_s$  representa la altura de ola que llega al pie del acantilado en cada caso con un nivel del mar correspondiente a  $N=3.59$  MOP.

**Tabla 10.3: Peso del bloque resultante de las fórmulas de van der Meer y Hudson**

Dirección	$H_o$ (m)	$T$ (seg)	$T_R$ (años)	$H_s$ (m)	$W_{v.d. Meer}$ (kg)	$W_{Hudson}$ (kg)
SE	3.6	8	2	1.63	210	365
	4.2	9	20	1.36	81	212
	4.4	9.5	50	1.2	44	146
	3.2	15	2	1.31	24	189
	4.2	15	50	1.41	32	236
E	2.5	7	---	1.88	425	560
	3	8	---	2.27	762	986
	3.5	9	---	1.29	66	181

Estos resultados señalan que bajo las condiciones estudiadas se requiere un bloque con un peso aproximado de una tonelada para garantizar la estabilidad estructural del espigón.

## 11 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó un relevamiento de la zona para la interpretación del proceso erosivo y la realización de un diagnóstico.

Habiendo observado la afectación de los distintos sectores y la ocupación de la franja costera se pudo establecer una zonificación para la asignación de prioridades.

Se proponen distintas tipologías para la solución o mitigación del problema.

Muro de gaviones.

Playa de gravas.

Espigón para la contención de materiales.

Se realizaron cálculos de predimensionamiento para diferentes tipos de obras.

## Anexo II - resultados del modelo BOUSS-2D y del método de convolución

perfiles	Hs (m)	T <sub>p</sub> (seg)	Lo (m)	S (m)	H <sub>b</sub> (m)	h <sub>b</sub> (m)	R(t) (m)
perfil 3	2	6	56.21	0.34	1.37	2.33	2.45
	2.5	7	76.50	0.43	2.40	2.59	3.09
	3	8	99.92	0.51	2.01	2.59	3.50
	3.5	9	126.47	0.60	1.70	2.59	3.57
	1.5	15	351.29	0.26	1.99	2.59	1.71
	2	15	351.29	0.34	1.89	2.59	2.40
	2.5	15	351.29	0.43	1.74	2.59	3.57
perfil 5	2	6	56.21	0.34	0.93	2.12	2.02
	2.5	7	76.50	0.43	1.77	2.12	1.87
	3	8	99.92	0.51	1.95	2.12	2.11
	3.5	9	126.47	0.60	1.24	2.12	3.37
	1.5	15	351.29	0.26	1.42	2.12	1.28
	2	15	351.29	0.34	1.52	2.12	1.65
	2.5	15	351.29	0.43	1.50	2.12	2.10
perfil 10	2	6	56.21	0.34	1.23	2.74	2.37
	2.5	7	76.50	0.43	1.69	2.74	2.54
	3	8	99.92	0.51	1.91	2.74	2.85
	3.5	9	126.47	0.60	1.23	2.74	4.27
	1.5	15	351.29	0.26	1.71	2.74	1.48
	2	15	351.29	0.34	1.72	2.74	1.99
	2.5	15	351.29	0.43	1.63	2.74	2.60
perfil 13	2	6	56.21	0.34	2.59	2.24	1.43
	2.5	7	76.50	0.43	1.93	2.24	2.34
	3	8	99.92	0.51	1.80	2.24	2.98
	3.5	9	126.47	0.60	1.49	2.24	4.01
	1.5	15	351.29	0.26	1.99	2.24	1.35
	2	15	351.29	0.34	1.88	2.24	1.90
	2.5	15	351.29	0.43	1.79	2.24	2.48
perfil 16	2	6	56.21	0.34	1.35	2.42	1.47
	2.5	7	76.50	0.43	1.79	2.42	1.51
	3	8	99.92	0.51	2.00	2.42	1.67
	3.5	9	126.47	0.60	1.56	2.42	2.39
	1.5	15	351.29	0.26	1.70	2.42	0.93
	2	15	351.29	0.34	1.86	2.42	1.17
	2.5	15	351.29	0.43	1.81	2.42	1.50
perfil 18	2	6	56.21	0.34	1.16	2.57	2.20
	2.5	7	76.50	0.43	2.26	2.57	1.73
	3	8	99.92	0.51	1.50	2.57	2.88
	3.5	9	126.47	0.60	1.40	2.57	3.54
	1.5	15	351.29	0.26	1.83	2.57	1.22

	2	15	351.29	0.34	1.98	2.57	1.54
	2.5	15	351.29	0.43	1.74	2.57	2.15
perfil 21	2	6	56.21	0.34	2.25	2.57	1.63
	2.5	7	76.50	0.43	2.09	2.57	2.19
	3	8	99.92	0.51	1.53	2.57	3.43
	3.5	9	126.47	0.60	1.37	2.57	4.36
	1.5	15	351.29	0.26	1.80	2.57	1.48
	2	15	351.29	0.34	1.92	2.57	1.88
	2.5	15	351.29	0.43	1.88	2.57	2.41
perfil 24	2	6	56.21	0.34	1.71	1.95	1.14
	2.5	7	76.50	0.43	1.81	1.95	1.36
	3	8	99.92	0.51	1.24	1.95	2.22
	3.5	9	126.47	0.60	1.24	1.95	2.61
	1.5	15	351.29	0.26	1.75	1.95	0.83
	2	15	351.29	0.34	1.76	1.95	1.11
	2.5	15	351.29	0.43	1.80	1.95	1.37