Proyecto de readecuación del puerto de La Paloma

Proyecto Hidráulica-Ambiental
Curso 2005
Facultad de Ingeniería
UdelaR

Tutores:
Ing. Luis Teixeira
Ing. Eugenio Lorenzo

Juan Pablo Martínez
Guillermo Santellán
Sebastián Solari

Indice

CAPITULO 1 - INTRODUCCIÓN 6

1.1. Alcance 6

1.2. Contexto 6

1.3. Estructura del informe 8

CAPITULO 2 - DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA COSTA URUGUAYA Y EN PARTICULAR DEL ARCO LA PALOMA - LA PEDRERA 10

2.1. Introducción 10

2.2. Caracterización del oleaje en aguas profundas 11
2.2.1. Descripción general 11
2.2.2. Datos de oleaje disponibles 12

2.3. Máximos y mínimos anuales de la altura del nivel del mar 17
2.3.1. Objetivo 17
2.3.2. Datos de base 17
2.3.3. Análisis estadístico de la altura del nivel del mar 17
2.3.3.1. Determinación de máximos del nivel del mar 17
2.3.3.2. Determinación de mínimos del nivel del mar 19

2.4. Geología de la costa uruguaya 20
2.4.1. Historia Geológica del Uruguay 20
2.4.2. Geología Descriptiva 24
2.4.3. Geología y mar 29

2.5. Geomorfología de la costa sureste de Uruguay 36
2.5.1. Elementos geomorfológicos 36
2.5.2. Acciones marinas y litorales 36
2.5.3. Acciones continentales 38
2.5.4. Playas actuales 39

2.6. Arco La Paloma-La Pedrera 44
2.6.1. Descripción de la playa 44
2.6.2. Composición granulométrica y pendiente media de la playa 44
2.6.3. Sobre el Espigón experimental 47
2.6.4. Posibles aportes desde el continente 48

CAPÍTULO 3 – DIAGNÓSTICO 49

3.1. Introducción 49

3.2. Objetivos específicos 50

3.3. Propagación del oleaje desde aguas profundas 51
3.3.1. Introducción 51
3.3.2. Objetivo 52
3.3.3. Conceptos generales 53
3.3.3.1. Fenómenos físicos involucrados en la propagación 54
3.3.3.2. Importancia de la profundidad en la propagación 55

3.3.3.3. Modelos numéricos de propagación 57
3.3.3.4. Elementos requeridos para llevar a cabo la propagación 58
3.3.4. Elementos disponibles para llevar a cabo la propagación 59
3.3.4.1. Datos de olas 59
3.3.4.2. Cálculo de un período representativo para cada altura de ola 59
3.3.4.3. Batimetrías sobre las que se propaga 65
3.3.4.4. Olas a ser propagadas sobre carta 1 66
3.3.4.5. Modelos numéricos de los que se dispone 67
3.3.5. Procedimiento de propagación 71
3.3.6. Resultados obtenidos 73
3.3.7. Conclusiones de la propagación del oleaje 78

3.4. Transporte de sedimentos **79**
3.4.1. Introducción y objetivos 79
3.4.2. Conceptos generales 79
3.4.2.1. Zona de rompiente 79
3.4.2.2. Corrientes cercanas a la costa 79
3.4.3. Estimación del transporte litoral 84
3.4.3.1. Estimación del transporte potencial 84
3.4.3.2. Método de flujo de energía 85
3.4.3.3. Estimación de K 86
3.4.3.4. Método de corriente litoral 87
3.4.4. Transporte litoral en arco La Paloma - La Pedrera 89
3.4.5. Conclusiones 91

3.5. Estimación del volumen de arena que ingresa al puerto **92**
3.5.1. Objetivo 92
3.5.2. Ingreso de arena entre dragados 93
3.5.3. Ajuste a una curva no-lineal múltiple 96
3.5.4. Estimación del ingreso anual de arena 101
3.5.5. Conclusiones 102

3.6. Estudio del equilibrio del arco de playa **103**
3.6.1. Introducción 103
3.6.2. Objetivo 104
3.6.3. Método de la parábola 105
3.6.4. Aplicación del método a la bahía La Paloma – La Pedrera 107
3.6.4.1. Oleaje predominante 107
3.6.4.2. Definición de los puntos duros y de los parámetros 110
3.6.5. Conclusiones derivadas de los resultados obtenidos 113
3.6.6. Estudio de las fotos aéreas disponibles 114
3.6.7. Estudio de la influencia de los dragados en el retroceso de la costa 117
3.6.7.1. Perfil de la playa 117
3.6.7.2. Volumen de arena involucrado en el retroceso 118
3.6.7.3. Conclusiones a partir de los resultados obtenidos 119
3.6.8. Conclusiones finales sección 3.6 119

3.7. Conclusiones generales del capítulo 3 ..... **121**

CAPÍTULO 4 – DISEÑO EN PLANTA DEL ESPIGÓN Y CAMBIO EN LA LÍNEA DE COSTA 122

4.1. Introducción **122**

4.2. Objetivo **123**

4.3. Modelos a ser aplicados **123**
4.3.1. Modelo de Pernald y Considère 123
4.3.2. Modelo de ola única. 125

4.3.3. Modelo de ola no estacionaria 127

4.4. Elección de los parámetros de entrada para los modelos **130**
4.4.1. Costa 130
4.4.2. Oleaje 130
4.4.2.1. Modelo de ola única 130
4.4.2.2. Modelo de ola no estacionaria 131

4.5. Verificación de los modelos **133**

4.6. Localización y dirección del espigón **134**

4.7. Longitud del espigón **136**

4.8. Tiempo de llenado del espigón y forma de la costa **137**
4.8.1. Modelo de ola única 137
4.8.2. Modelo de ola no estacionaria 138
4.8.3. Conclusiones de la sección 4.8 140

4.9. Conclusiones **141**

CAPITULO 5 – SELECCIÓN DE TIPOLOGÍA Y DISEÑO ESTRUCTURAL DEL ESPIGÓN **143**

5.1. Introducción **143**

5.2. Cálculo de los parámetros de diseño **143**
5.2.1. Introducción 143
5.2.2. Procedimiento 143
5.2.3. Análisis estadístico de las olas 144

5.3. Tipología del espigón **148**

5.4. Espigón de material suelto natural o artificial **149**
5.4.1. Generales sobre el tamaño de roca y la sección 151
5.4.2. Generales sobre la protección de pie 153
5.4.3. Generales sobre la fundación 154

5.5. Diseño final del espigón sobrepasado **156**

5.6. Diseño final del espigón sumergido **158**

5.7. Espigón vertical de hormigón **160**

CAPÍTULO 6 – COSTOS **161**

6.1. Introducción **161**

6.2. Espigón sobrepasado **161**
6.2.1. Volumen de material 162
6.2.2. Duración de la obra 162
6.2.3. Costos espigón sobrepasado de roca 163
6.2.4. Costos espigón sobrepasado de bloques de hormigón 165

6.3. Espigón sumergido **167**
6.3.1. Volumen de material 167
6.3.2. Duración de la obra 167
6.3.3. Costos espigón sumergido de roca 168

6.3.4. Costos espigón sumergido de bloques de hormigón 170

6.4. Selección de una alternativa **172**

6.5. Descripción del proceso constructivo de la alternativa seleccionada **173**

CAPÍTULO 7 - GESTIÓN Y MANTENIMIENTO DEL ESPIGÓN 175

7.1. Introducción **175**

7.2. Objetivo **175**

7.3. Mantenimiento de la línea de costa **176**
7.3.1. Sitio elegido para la disposición final 176
7.3.2. Metodología de disposición 177

7.4. Reparación y rehabilitación del espigón **178**

7.5. Plan de monitoreo y control **181**
7.5.1. Monitoreo de la estructura 181
7.5.2. Frecuencia de monitoreo 182
7.5.3. Monitoreo de funcionamiento 182
7.5.4. Datos complementarios 183

7.6. Conclusiones del capítulo **184**

CAPÍTULO 8 – CONSIDERACIONES AMBIENTALES 185

8.1. Introducción **185**

8.2. Análisis ambiental del emprendimiento **185**
8.2.1. Fases del emprendimiento 185
8.2.1.1. Fase de construcción 185
8.2.1.2. Fase de operación 188
8.2.1.3. Fase de abandono 189
8.2.2. Caracterización del medio 190
8.2.2.1. Medio Físico 191
8.2.2.2. Medio Biótico 192
8.2.2.3. Medio Antrópico 193
8.2.2.4. Medio Simbólico 194

8.3. Afectaciones sobre el medio ambiente **194**
8.3.1. Afectaciones en la fase de construcción 196
8.3.1.1. Afectación sobre el transporte e infraestructura vial 196
8.3.1.2. Imposición del obrador y acopio del material 197
8.3.1.3. Vertimiento de aceites 198
8.3.1.4. Ruidos y polvo 198
8.3.1.5. Dragado inicial del puerto 198
8.3.2. Afectaciones en la fase de Operación 202
8.3.2.1. Cambio en la línea de costa 202
8.3.2.2. Modificación del patrón de circulación de corrientes 203
8.3.2.3. Afectaciones sobre la biota 204
8.3.2.4. Cambios en la operativa del puerto 204
8.3.2.5. Dragado de mantenimiento del canal de acceso al puerto 205
8.3.2.6. Vaciamiento del espigón 206
8.3.2.7. Mantenimiento del espigón 206
8.3.2.8. Afectaciones sobre el paisaje 207

8.4. Plan de monitoreo y control ambiental 210

8.5. Conclusiones 212

BIBLIOGRAFÍA 213

ANEXO I 215

ANEXO II 216

ANEXO III 229

CAPITULO 1 - Introducción

1.1. Alcance

El objetivo del presente proyecto es proponer las principales características de una obra de bajo costo destinada a controlar el ingreso de arena a la rada portuaria del puerto de La Paloma, Departamento de Rocha, que actualmente causa la sedimentación de arena en buena parte de los muelles existentes en dicho puerto.

A su vez el proyecto busca analizar las implicancias ambientales que dicha obra acarrearía, particularmente en lo que refiere al impacto sobre el sector de playa contiguo a la obra (en el arco de playa entre La Paloma y La Pedrera).

1.2. Contexto

La zona de La Paloma, que abarca el balneario de La Paloma y los balnearios satélite de La Aguada, Costa Azul y Arachania, es la principal locación turística del departamento de Rocha y cuenta en la actualidad con unos 5.300 habitantes permanentes recibiendo, en los meses de verano, alrededor de 30.000 turistas.

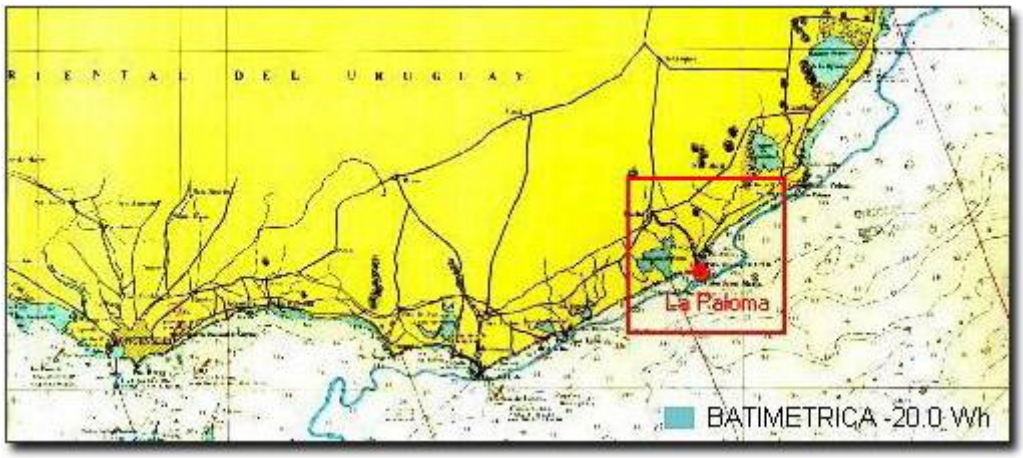


Figura 1.1 – Plano general de la zona.

Por su parte, el puerto de La Paloma se encuentra en el Cabo Santa María, ubicado en latitud 34º 39´ S y longitud 54º 08´. Dista 280km por tierra al este de la capital del país, Montevideo, y 28km por tierra de la capital departamental, Rocha.

Figura 1. 2- Vista en planta del puerto de La Paloma. (adaptado de página web de la Dirección Nacional de Hidrografía)

Este puerto se erigió en 1910, junto con una vía férrea que comunicaba La Paloma con la ciudad de Rocha. Para la construcción del puerto fue necesaria la construcción de una escollera de cierre con dirección NW, que se prolonga 600m a partir de la extremidad N de la península. Esta península era anteriormente una isla, que fue unida a tierra firme para darle mayor cierre al puerto.

El puerto de La Paloma consta de tres muelles comerciales y deportivos construidos en diferentes períodos. El último en construirse (muelle 3) es el que dejó en evidencia los serios problemas de aterramiento que se presentan. Este muelle, de unos 340m de largo siguiendo la línea de costa hacia el NW, prácticamente no es utilizado debido al importante aterramiento que se produce en la zona de amarras.

En particular, durante la década de 1980, cuando el puerto tuvo su mayor actividad comercial debido a diferentes industrias pesqueras instaladas en la zona, los dragados se efectuaban con una periodicidad anual, extrayéndose un volumen de arena promedio superior a los 100.000m^3 anuales. A pesar de esto, el muelle 3 nunca fue utilizado en toda su capacidad.

A pesar de que la intensidad comercial del puerto ha disminuido (principalmente por el cierre de importantes industrias pesqueras que actuaban en la zona), este problema causa una serie de variados inconvenientes en el puerto que vale la pena destacar.

- Para un buen funcionamiento del puerto en toda su capacidad se requiere un importante volumen de dragado, prácticamente constante, de lo contrario el puerto ve considerablemente disminuida su capacidad de amarras, teniendo que “amadrinar” los barcos que a él llegan y disminuyendo la maniobrabilidad dentro del puerto.

- A pesar de no utilizar el muelle 3, el aterramiento de arena en los otros muelles (si bien menor) igual se produce, obligando a efectuar dragados con una periodicidad mayor que la deseada.

Estos inconvenientes pueden causar una pérdida económica importante, ya sea por el costo de los dragados o por pérdida de barcos que no amarran en este puerto por no tener lugar físico disponible. A su vez, este hecho causa una complicación para los barcos que sí deciden amarrarse, muchos de ellos "amadrinados" a otros barcos, generando complicaciones de maniobras. Esto repercute negativamente en la calidad del servicio brindado por el puerto.

Por su parte, el arco de playa ubicado al NW del puerto de La Paloma (arco de playa La Paloma-La Pedrera) tiene una longitud aproximada de 7.5km y es uno de los principales atractivos turísticos de la zona. La zona sur de dicho arco, correspondiente a las playas de La Aguada y Costa Azul, ha evidenciado un retroceso en su línea de costa. Es parte de este informe estudiar la posible relación entre las actividades en el puerto de La Paloma (construcciones pasadas y futuras, dragados) y este retroceso.

1.3. Estructura del informe

El presente informe se encuentra organizado en 8 capítulos.

En el capítulo 2 se presenta una breve descripción del clima de mareas y el clima de oleaje en aguas profundas. A su vez, en este capítulo se describen someramente las principales características geológicas y geomorfológicos de la región, haciendo especial énfasis en el arco de playa La Paloma - La Pedrera.

En el capítulo 3 se diagnostica el problema; para esto se estudia el clima de oleaje en la costa y el transporte de sedimentos, contrastando estos resultados con los datos de dragado y batimetrías dentro del puerto obtenidos en la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH). A su vez, mediante fotos aéreas y la aplicación de modelos empíricos, se estudia el posible estado de equilibrio o retroceso del arco de playa La Paloma-La Pedrera.

El capítulo 4 está enfocado al prediseño de una solución y al estudio preliminar de sus posibles afectaciones en las playas contiguas. En este capítulo se define la localización en planta y la longitud del espigón de cierre. Una vez definidos estos elementos se discuten, en el capítulo 5, diferentes tipologías para un espigón de cierre, diseñándose distintas opciones estructurales para la tipología seleccionada. Finalmente en el capítulo 6 se estudian los costos de las distintas opciones estructurales optándose por una de ellas.

En el capítulo 7 se establecen criterios generales de gestión y mantenimiento del espigón una vez construido.

Por último en el capítulo 8 se presentan algunas consideraciones ambientales a tener en cuenta durante la construcción del espigón y para su gestión una vez construido. Se estudian también las posibles afectaciones que el espigón

puede tener sobre el medio ambiente, presentándolo como una solución amigable con el entorno y beneficiosa para la preservación de la playa.

CAPITULO 2 - Descripción general de la costa uruguaya y en particular del arco La Paloma - La Pedrera

2.1. Introducción

La costa es un lugar por definición de transición. De transición entre el mar y el continente. De transición entre un pasado histórico que la determinó y futuro próximo en el que sin lugar a dudas no permanecerá igual. Es por esto que no debe ser analizada como un entorno independiente y estático, sino como un sistema dinámico, abierto, con intercambio de masa y energía constante con el entorno que la rodea. En este caso, en que en principio sólo sería de interés el estudio de una zona acotada de la costa de Rocha es necesario abarcar, aunque sea de forma primaria, toda la región, no sólo en el presente sino como síntesis de un proceso histórico.

En este capítulo se da una descripción general de la zona en la que está emplazado el puerto, tanto en lo que respecta al mar como al continente. Se pretende aquí sentar las bases para una comprensión cabal del comportamiento de la zona y en particular del sistema costero, poniendo especial atención a los sedimentos, a posibles aportes de arena, al nivel de las mareas y al comportamiento del oleaje en alta mar.

En la sección 2.2 se describe el clima de oleaje en aguas profundas, determinándose una rosa de olas en aguas profundas que es utilizada en secciones posteriores para definir el clima de oleaje en las cercanías del puerto.

En la sección 2.3 se estudian los valores mínimos y máximos del nivel del mar con el fin de poder establecer los valores mínimos y máximos para un período de retorno dado.

En las secciones 2.4 y 2.5 se describen las características geológicas y morfológicas de la región sureste del país, así como los agentes que los produjeron, recalcándose la importancia de las variaciones del nivel del mar en este proceso.

En la sección 2.6 se hace una descripción general del arco de playa La Paloma - La Pedrera, haciendo una evaluación primaria y cualitativa de los posibles aportes de sedimentos que pudieran producirse desde el continente, así como de los posibles fenómenos erosivos que pudieran darse en la misma.

2.2. Caracterización del oleaje en aguas profundas

2.2.1. Descripción general

Existen dos estados de agitación del mar bien diferenciados, que se denominan mar de viento ("sea") o mar de fondo ("swell").

El primero se presenta cuando el viento actúa sobre la superficie de la zona observada y se caracteriza por la irregularidad del oleaje, tanto en intensidad como en dirección. En aguas profundas las olas son de diverso tamaño y se desplazan a diferentes velocidades, mayores para las olas más grandes y menores para las pequeñas. Algunas de ellas llegan a tener pendientes mayores que las de estabilidad dinámica y su cresta se precipita hacia delante rompiéndose y formando espuma. Este fenómeno produce una pérdida de energía que contrarresta en cierta medida la energía que le está proporcionando el viento.

El resultado de este tipo de olas es un mar agitado con olas que pueden avanzar en cualquier dirección, si bien la resultante general de todos los movimientos coincide, en aguas profundas, con la dirección del viento.

El mar de fondo se presenta cuando no hay viento y las olas se desplazan con notable regularidad, tanto en lo que se refiere a su tamaño y longitud de onda como a su dirección. Estas olas provienen de centros de agitación situados a veces a centenares de kilómetros del lugar de observación y debido a que las olas de mayor período (y por tanto longitud de onda) viajan más rápido y pierden menos energía que las de período pequeño, este tipo de oleaje se caracteriza por tener un período mayor que el oleaje de viento.

Entre estos dos estados extremos del mar ocurren infinidad de estados intermedios por superposición de efectos. También puede no presentarse ninguna de estas situaciones y aparecer el mar en calma, aunque es muy poco frecuente la situación de calma absoluta; en general casi siempre se aprecia algún indicio de mar de fondo.

En particular, en la costa atlántica, se da un estado de permanente agitación (aunque ésta sea pequeña) debido al mar de fondo proveniente del SSE. El cinturón depresionario subpolar, de permanente agitación, es fuente de generación de oleaje que recorren tres o cuatro mil kilómetros a través del Atlántico Sur hasta llegar al Río de la Plata y a las costas atlánticas.

La figura 2.1 muestra que el oleaje generado por el cinturón depresionario subpolar genera olas que inciden en la costa Atlántica uruguaya con un ángulo promedio de 19.5º con respecto al paralelo 35º. Si el ángulo se mide tomando como 0º al Norte, creciendo en sentido horario y representando la dirección de la ola como el ángulo de donde proviene, la ola generada por el cinturón depresionario subpolar alcanzaría la costa Atlántica uruguaya con un ángulo de 160.5º.

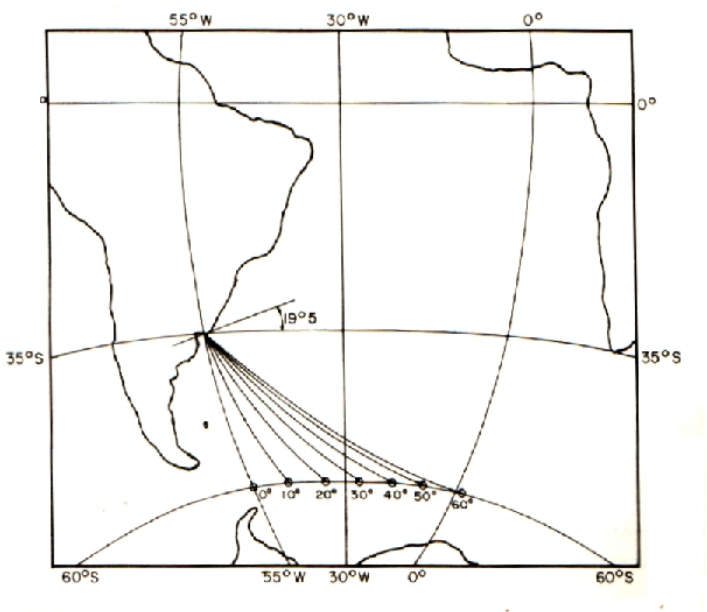


Figura 2.1. - Dirección del oleaje generado en el cinturón depresionario subpolar influenciado por la esfericidad terrestre. (MTOP-1979- Conservación y mejora de playas)

2.2.2. Datos de oleaje disponibles

Los datos originales de los que se dispone corresponden a observaciones visuales registradas en la zona 34S - 36S, 53W - 55W, durante el período Enero 1949 a Junio 1996. Fueron tomados 5558 datos en el correr de los años de registro, lo que corresponde a un promedio de 117 datos por año.

Dichos datos fueron recopilados y procesados por el Servicio Meteorológico Ingles. En la figura 2.2 se puede ver el área de registro de oleaje:

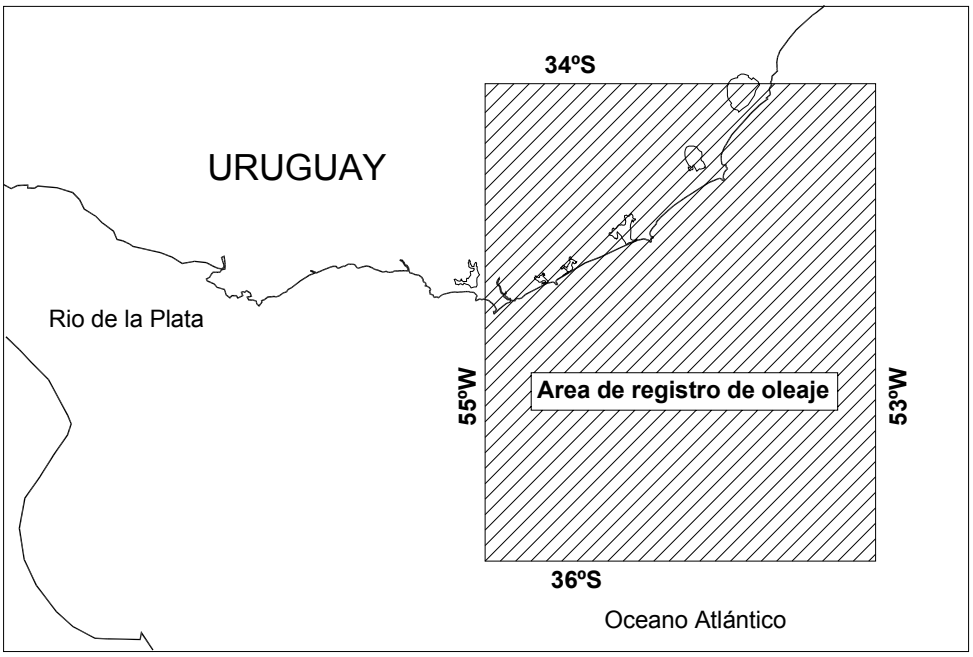


Figura 2.2 – Representación gráfica del área de registro de oleaje

Las observaciones están presentadas en tablas Altura-Dirección y en tablas Altura-Período. En ambos casos se tienen tablas mensuales (una tabla por mes) y una tabla anual.

- *Tabla Altura-Dirección anual.* En estas tablas se agrupan las observaciones según su altura significativa y luego cada grupo es subdividido según la dirección de propagación. A cada ola definida por su altura significativa y su dirección de propagación le corresponde una frecuencia de ocurrencia anual (**Tabla 2.1**)

- *Tabla Altura-Período anual.* En este caso las observaciones también son agrupadas según la altura significativa pero aquí los subgrupos se toman según cual sea el período de la ola. A cada ola definida por su altura significativa y su período le corresponde una frecuencia de ocurrencia anual (**Tabla 2.2**)

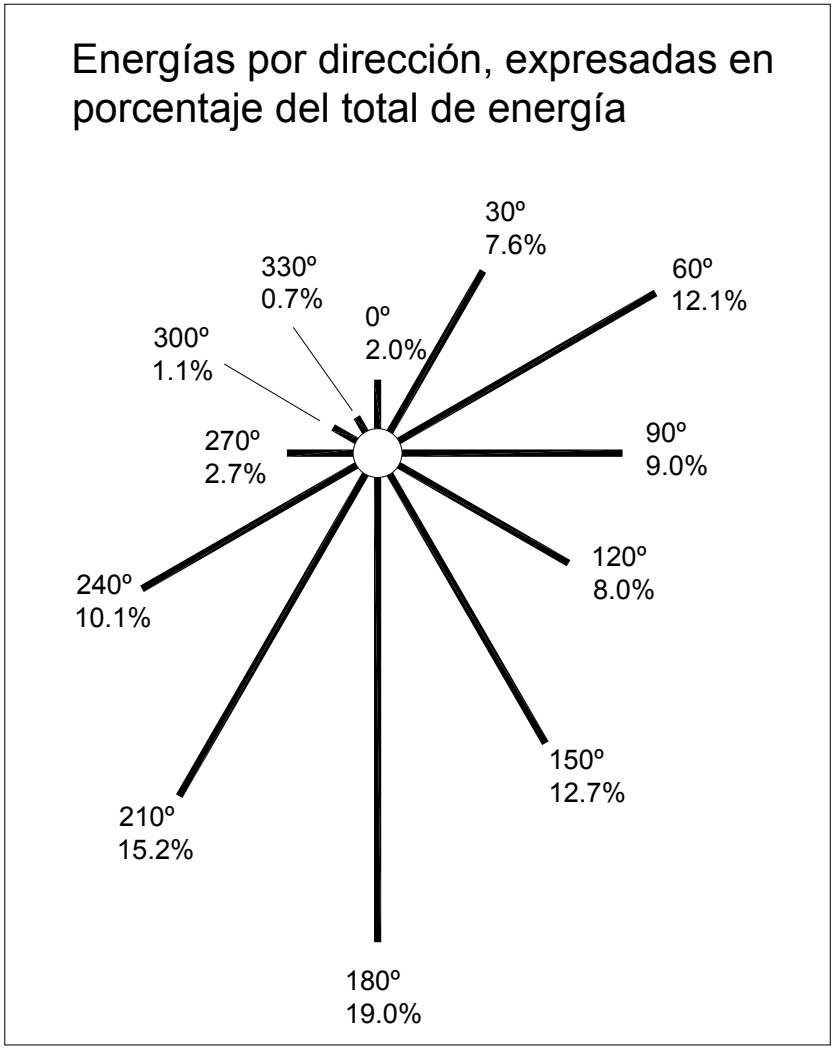
Frecuencias Anuales																
Altura de ola significativa (m)			**Dirección**													
			Registros sin dirección definida	346 a 15	16 a 45	46 a 75	76 a 105	106 a 135	136 a 165	166 a 195	196 a 225	226 a 255	256 a 285	286 a 315	316 a 345	**Frecuencia total por altura**
0	a	0.5	1.3	2.3	3.7	4.9	2.1	1.3	1.9	2.0	1.3	1.5	0.9	0.8	1.1	25.0
0.6	a	1.0	0.1	1.1	2.3	4.4	2.3	1.2	1.9	2.1	1.7	1.4	0.6	0.8	0.7	20.4
1.1	a	1.5	0.0	0.8	2.5	4.0	2.8	1.8	2.7	3.6	2.5	1.6	0.5	0.3	0.4	23.7
1.6	a	2.0	0.0	0.5	1.1	2.0	1.2	0.8	1.7	2.0	1.5	1.0	0.5	0.1	0.0	12.5
2.1	a	2.5	..	0.1	0.7	0.8	1.1	0.9	1.2	1.9	1.2	0.8	0.2	0.1	0.1	8.9
2.6	a	3.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	1.0	0.6	0.5	0.2	0.1	0.0	4.4
3.1	a	4.0	..	0.0	0.2	0.4	0.3	0.3	0.5	0.7	0.6	0.5	0.1	0.0	0.0	3.7
4.1	a	5.0	..	..	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	..	1.1
5.1	a	6.0	..	..	0.0	..	..	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	..	..	0.3
6.1	a	7.0	..	..	..	..	..	0.0	..	0.0	0.0	..	..	..	..	0.1
7.1	a	8.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
8.1	a	9.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
9.1	a	10.0	..	..	..	..	..	..	..	0.0	..	..	..	..	..	0.0
10.1	a	12.0	..	..	..	..	..	0.0	..	..	..	..	..	..	..	0.0
12.1	a	14.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
14.1	a	16.0	..	..	..	..	..	..	0.0	..	..	..	..	..	..	0.0
16.1	a	18.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
18.1	a	20.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
20.1	o mayor		..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Frecuencia total por dirección			1.4	4.9	10.8	17.0	10.2	6.8	10.6	13.5	9.7	7.5	3.0	2.3	2.3	

Tabla 2.1 – Tabla Altura – Dirección anual

Frecuencias anuales												
Altura de ola significativa (m)			Período (s)									
			0 a 5	6 a 7	8 a 9	10 a 11	12 a 13	14 a 15	16 a 17	18 a 19	20 a 21	22 o mayor	Frecuencia total por altura
0	a	0.5	21.7	2.1	0.6	0.4	0.1	0.0	0.0	0.1	..	..	25.0
0.6	a	1.0	14.3	4.4	1.0	0.5	0.1	..	0.1	..	..	..	20.4
1.1	a	1.5	11.4	8.0	3.0	1.0	0.3	0.1	0.0	..	..	..	23.7
1.6	a	2.0	4.4	4.5	2.4	0.6	0.3	0.1	..	..	..	..	12.5
2.1	a	2.5	2.7	3.5	1.8	0.4	0.3	0.1	0.0	..	..	..	8.9
2.6	a	3.0	0.6	1.5	1.3	0.5	0.3	0.1	0.0	..	..	..	4.4
3.1	a	4.0	0.5	1.4	1.0	0.4	0.1	0.2	..	0.0	..	..	3.7
4.1	a	5.0	0.1	0.4	0.4	0.2	0.1	0.0	..	..	..	..	1.1
5.1	a	6.0	..	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	..	..	..	..	0.3
6.1	a	7.0	..	0.0	0.0	..	..	..	..	..	..	..	0.1
7.1	a	8.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
8.1	a	9.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
9.1	a	10.0	..	..	..	0.0	..	..	..	..	..	..	0.0
10.1	a	12.0	..	..	0.0	..	..	..	..	..	..	..	0.0
12.1	a	14.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
14.1	a	16.0	..	..	0.0	..	..	..	..	..	..	..	0.0
16.1	a	18.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
18.1	a	20.0	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
20.1	o mayor		..	..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
Frecuencia total por período			55.8	25.8	11.7	4.2	1.6	0.7	0.1	0.1	..	..	

Tabla 2.2 - Tabla Altura – Período anual

A partir de estas tablas se pueden confeccionar tanto una rosa de oleaje como una rosa de energía. Estas se aprecian a continuación.



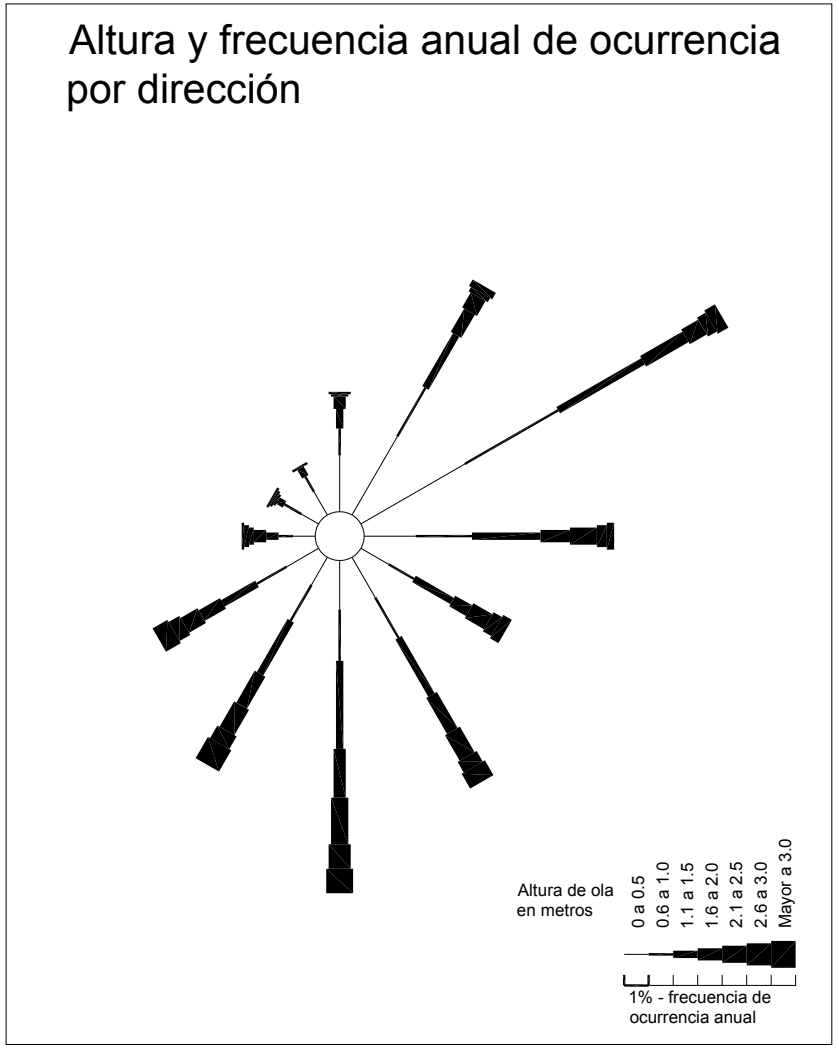


Figura 2.3 – Rosa de frecuencias anuales de altura de ola y de energía según dirección de incidencia

Bajo la hipótesis simplificativa de que las olas se distribuyen uniformemente dentro de cada intervalo, se puede generar un histograma de oleaje que represente la frecuencia del oleaje en función de la altura de ola. La hipótesis de la distribución uniforme fue tomada debido a que los intervalos de altura donde fueron observadas las olas no son constantes, comenzando con 0.5m y finalizando con 1m para las olas mayores. Es por esto que para poder formar un histograma con intervalos equiespaciados hay que tomar alguna hipótesis de este tipo.

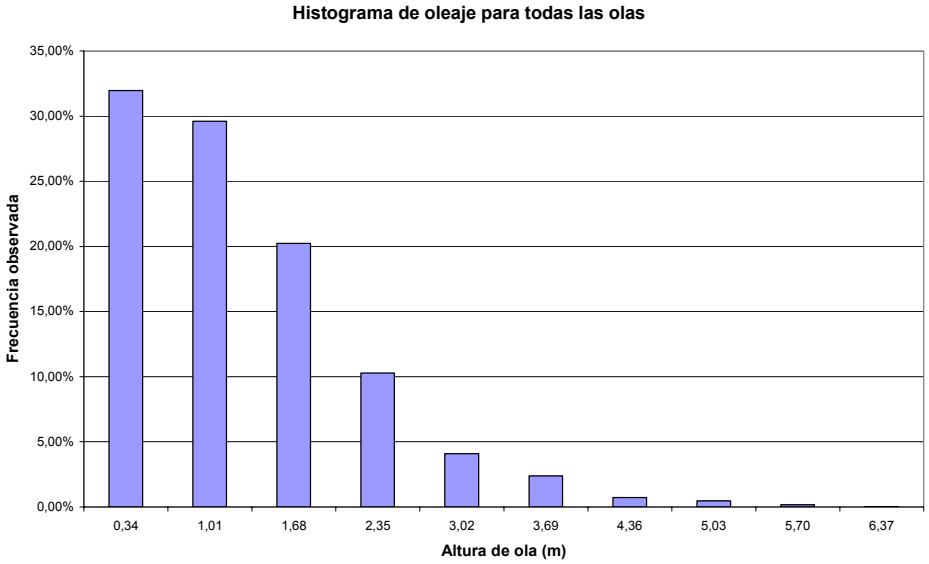


Figura 2.4 – Histograma de oleaje para la totalidad de las olas observadas

A su vez se puede caracterizar el conjunto de datos a partir de su media y su desviación estándar, obteniendo:

Parámetros de la muestra	
Promedio	1,25m
Desviación estandar	0,951m

Tabla 2.3 – Promedio y desviación estándar de los datos de altura de ola

Estos resultados corresponden al clima de oleaje en aguas profundas, variando sustancialmente su comportamiento a medida que se acerca a la costa.

En el capítulo 3 son tomados estos datos para ser propagados hasta la costa, determinándose así el clima de oleaje en la playa La Paloma-La Pedrera. Son entonces estos datos un insumo fundamental para la calificación y cuantificación de los diversos fenómenos que se dan en este tramo de playa.

2.3. Máximos y mínimos anuales de la altura del nivel del mar

2.3.1. Objetivo

El objetivo de esta sección es, a partir de la serie histórica de mínimos y máximos anuales de altura del nivel del mar, estimar los niveles de éste a 5, 10 y 20 años de período de retorno.

Conocer el nivel del mar para un período de retorno dado es de vital importancia para saber de que manera interferirá éste en las posibles soluciones que se puedan dar a la problemática del puerto. Particularmente, el nivel del mar tiene gran importancia a la hora de dimensionar la obra.

2.3.2. Datos de base

Los datos de base disponibles fueron tomados en el puerto de La Paloma desde 1913 hasta 2004, habiendo algunos años donde no se registraron datos. En total son 55 datos, los cuales incluyen mínima y máxima anual a partir de la mínima y máxima mensual, incluyendo también el porcentaje de meses faltantes en los cuales no se midió.

A partir de esta tabla se decide considerar un registro como válido siempre que tenga al menos el 75% de los meses medidos; de otra manera se descarta.

2.3.3. Análisis estadístico de la altura del nivel del mar

El hecho de contar con un período de observación de 92 años de los cuales se poseen 50 datos permite asumir que estos son suficientemente representativos del clima general de la zona, y por tanto permite trabajar directamente con los datos para hallar las alturas en el nivel del mar de 5, 10 y 20 años de período de retorno.

2.3.3.1. Determinación de máximos del nivel del mar

Se asume que los datos siguen una probabilidad según Weibull. Luego de ordenarlos de mayor a menor altura, la probabilidad que se le asigna a cada dato está dada por la siguiente relación:

$$P(X \geq x) = \frac{n}{m+1}$$

Donde:

n =posición que ocupa el dato
m =cantidad de datos

Esta fórmula tiene como ventaja que no le asigna el 100% de probabilidad a ningún dato. En contrapartida, al primer dato le asigna un tiempo de retorno de m+1 siendo m el total observado.

Teniendo la cantidad de datos y la probabilidad buscada es sencillo hallar la posición del dato que cumple con esa probabilidad según Weibull.

Para hallar la probabilidad que corresponde a un tiempo de retorno de T_0 años se utiliza la relación:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T}$$

Donde T es la cantidad promedio de datos que fueron observados para el tiempo de retorno T_0 buscado.

De esa manera:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T_o(m/t)}$$

Donde=

T_o =tiempo de retorno buscado (años)
m =cantidad de datos
t =tiempo de observación (años)

Igualando esta relación a la probabilidad dada por Weibull obtenemos:

$$\frac{n}{m+1} = \frac{1}{T_o(m/t)} \Rightarrow n = \frac{t \cdot (m+1)}{T_o \cdot m}$$

De esta manera se obtiene el número de dato en el orden establecido que corresponde a la altura del nivel del mar para el tiempo de retorno buscado. A continuación se observan los resultados obtenidos.

T retorno (años)	Altura (m)
5	2.06
10	2.22
20	2.32

Tabla 2.4 - Alturas máximas del nivel del mar para 5, 10 y 20 años de período de retorno.

2.3.3.2. Determinación de mínimos del nivel del mar

En este caso también se asume que los datos siguen una distribución tipo Weibull, pero ahora se ordenan de menor a mayor altura, asignándole a cada dato la probabilidad

$$P(X \leq x) = \frac{n}{m+1}$$

Donde:

n =posición que ocupa el dato
m =cantidad de datos

El razonamiento es análogo al desarrollado para el ajuste de máximos del nivel del mar, obteniendo:

$$\frac{n}{m+1} = \frac{1}{T_o(m/t)} \Rightarrow n = \frac{t \cdot (m+1)}{T_o \cdot m}$$

Donde=

T_o =tiempo de retorno buscado (años)
m =cantidad de datos
t =tiempo de observación (años)

De esta manera se obtienen los niveles mínimos del nivel del mar para diferentes períodos de retorno.

T retorno (años)	Altura (m)
5	-0.12
10	-0.28
20	-0.43

Tabla 2.5 - Alturas mínimas del nivel del mar para 5, 10 y 20 años de período de retorno.

2.4. Geología de la costa uruguaya

En las siguientes secciones se hace una descripción de las principales formaciones geológicas de la costa este uruguaya así como los procesos que las conformaron. Tanto la descripción geológica como los datos de las playas, excepto referencia expresa, fueron tomados de la publicación realizada por el MTOP en cooperación con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo de UNESCO titulada "Conservación y mejora de playas", 1973 (MTOP, URU.73.007 1980). La completitud y el alcance de esa publicación justifica largamente las diferencias que puedan existir con otros autores u otos trabajos más recientes. En particular en lo que respecta al esquema estratigráfico, ya que elimina, sin justificación debida, las unidades Dolores, Limos de la Floresta y Punta de Loberos y posiciona la Formación Libertad en el Holoceno, lo que no coincide con estudios de otros autores.

2.4.1. Historia Geológica del Uruguay

La historia geológica del Uruguay comienza a desarrollarse, al igual que la del resto del planeta, hace más de 4600 millones de años (M.a.) (ver Tabla 2.6). Sin embargo son de interés solo algunas formaciones del Proterozoico, y de las eras Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico, en las que se hará mayor hincapié, ya que en cada una de estas se sucedieron distintos acontecimientos que dieron forma a nuestra costa actual.

Historia geológica						
Eon	Era	Periodo		epoca	Duracion (M.a.)	Hasta (M.a.)
Fanerozoico	Cenozoico	Cuaternario		Holoceno	0,01	0,01
				Pleistoceno	1,6	1,6
		Terciario	Neógeno	Plioceno	3,7	5,3
				Mioceno	18,4	23,7
			Paleógeno	Oligoceno	12,9	36,6
				Eoceno	21,1	57,8
				Paleoceno	8,6	66,4
	Mesozoico	Cretácico			78	144
		Jurácico			64	208
		Triácico			37	245
	Paleozoico	Pérmico			41	286
		Crarbonífero			74	360
		Devónico			48	408
		Silúrico			30	438
		Ordóvico			67	505
		Cámbrico			64	570
Proterozoico	Superior				330	900
	Medio				700	1600
	Inferior				900	2500
Arquezoico	Superior				500	3000
	Medio				400	3400
	Inferior					4600

Tabla 2.6 – Historia geológica

En la figura 2.5 se presentan las principales formaciones que afloran en la costa sureste del Uruguay.

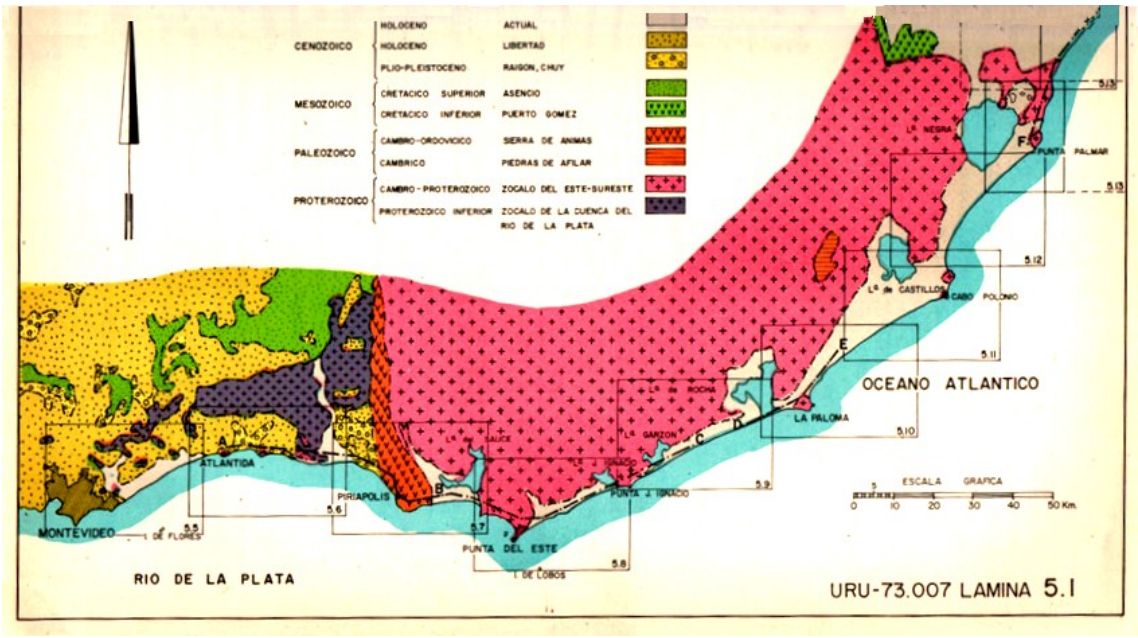


Figura. 2.5 - Afloramientos de formaciones Extraído de MTOP (1979) Conservación y mejora de playas

1. Proterozoico:

Las rocas más antiguas que se encuentran en nuestra región datan de hace más de 2000 millones de años (M.a.). Estas son rocas plutónicas metamórficas, que conformaron el zócalo de la Cuenca del Plata, parte del gran Escudo de Brasilia. Otras rocas metamórficas de interés fueron originadas hacia fines del Proterozoico. Estas rocas reciben el nombre de Zócalo del Este.

2. Paleozoico:

Las cuencas surgidas en el Proterozoico permiten las primeras formaciones sedimentarias; es así que hace 500 a 400 M.a. aparece la formación Piedras de Afilar, que aflora en las cercanías del arroyo Solís Grande. Por otro lado se produce también (400 a 350 M.a.) la aparición de rocas intrusivas, hipavisales y efusivas, que forman una gran masa de rocas que corre en dirección Sur-Norte, desde Punta Negra en el departamento de Maldonado, dando lugar a la formación Sierra de la Ánimas.

3. Mesozoico:

Entre el Paleozoico y el Mesozoico se producen una serie de movimientos tectónicos que originan la destrucción del gran continente de Godwana, con la separación de los continentes Americano y Africano.

También se suceden algunos derramamientos de lava que dan origen a la formación Puerto Gómez. Al mismo tiempo se producen hundimientos diferenciados en distintas zonas que dan origen a cuencas tectónicas

plausibles de ser llenadas con sedimentos continentales. Areniscas, lutitas y conglomerados, integrantes de la formación Míguez, llenan las cuencas de Santa Lucía, de Punta del Este y del Salado. Esta formación es cubierta más adelante con materiales arenosos de la formación Asencio. Estos sedimentos afloran principalmente en la cercanía del río Uruguay, y no tanto en el sureste uruguayo. A pesar de esto es posible que a través de la red fluvial parte de estos sedimentos hayan llegado a las costas aportando arena a ciertas playas.

4. Cenozoico:

El comienzo del Cenozoico está marcado por movimientos tectónicos que producen un basculamiento con hundimiento hacia el este produciendo una pendiente regional hacia esta dirección. Movimientos epirogénicos producen varias ingresiones y regresiones del nivel del mar, que si bien alcanzan un mayor desarrollo en la cuenca del Salado también tiene un importante impacto sobre el basamento cristalino uruguayo.

Esto hace que los sedimentos del Cenozoico sean una alternancia constante de arenas de tipos costeras (dunas y playas) con sedimentos finos estuáricos y continentales, como arcillas rojas y grises. En algunas zonas también se han dado las condiciones para que se originaran sedimentos calcáreos, en forma de bancos de calizas y coquinas de origen lagunar y costanero.

El Cenozoico puede subdividirse de la siguiente forma:

- Oligo-Plioceno:

  En un ambiente de sedimentación continental propicio para el transporte eólico se da la sedimentación de sedimentos detríticos, limosos y de arenas finas. Estos dan origen a la formación Fray Bentos.

  En la transición del Mioceno al Plioceno se dan varios eventos de regresión e ingresión del nivel del mar.

- Plioceno:

  En este ambiente marino litoral se produce la sedimentación de arenas, arcillas y lumaquelas, dando origen a la formación Camacho.

- Plio-Pleistoceno:

  En un ambiente ahora litoral continental, fluvial o deltaico algunos sedimentos cubren a la formación Camacho. A esta formación se la conoce como formación Raigón.

- Pleistoceno:

  Se produce la formación Chuy, compuesta en la base por arenas y areniscas arcosas, arcillas y conglomerados; siendo rematados en la parte

superior por sedimentos limosos, loess y lodolitas. En algunas zonas esta formación es cubierta por la formación Vizcaíno.

- Holoceno:

En un ambiente netamente continental, con muy poca participación de agua, se produce la formación Libertad, compuesta por lodolitas y loess.

Este proceso que llevó millones de años puede resumirse en la siguiente tabla:

Era	Periodo	Epoca	Formación
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Arenas de playas, médanos y aluviones.
			Cordones litorales,playas y médanos antiguos.
			Arcillas gríces, paleosuelos y turbas.
			Lodolítas pardas de formación Libertad.
		Pleistoceno	Arenas, arcillas y lodolitas de la f. Chuy.
			Arcillas gríces de la formación Vizcaíno
	Terciario	Plio- Pleistoceno	Formación Raigón y Malvín.
			Formación Martín chico Inferior.
		Plioceno	Formación Camacho.
		Oligo -Mioceno	Formación Fray Bentos.
Paleozoico	Ordóvico		Formación Sierra de Animas.
	Cámbrico		Formación Piedras de Afilar.
Cambro-proterozoico			Granitos Intrusivos.
			Rocas Metamórficas del zócalo del este.
Inferior			Zócalo de la Cuenca del Río de la Plata

Tabla 2.7 - Formaciones

2.4.2. Geología Descriptiva

A continuación se detallan las formaciones más importantes en cuanto a la construcción de la costa uruguaya y en particular del arco de playa a considerar por el estudio.

1 Zócalo de la cuenca del Río de la Plata:

Compuesta principalmente por gneises de grano medio a grueso (1 a 3 mm) homogéneos compuestos por feldespato potásico, plagioclasa, cuarzo y biotita. En la zona Atlántica el gneis pasa gradualmente a granito de grano grueso (de 2 a 5mm). Asociado al gneis aparecen fajas delgadas de micaesquistos a biotita y de anfibolitas, así como pegmatitas.

En los afloramientos que se encuentran contra el mar los minerales aparecen con muy bajo grado de alteración ya que la alta erosión existente hace que los minerales alterados no pueden ser retenidos, desprendiéndose rápidamente.

2 Zócalo del Este:

Los afloramientos de esta formación son muy escasos, limitándose a puntas o promontorios en las cercanías de las costas del este. Las rocas que lo componen son: cuarcitas (Punta y Sierra Ballena), gneises (Punta del Chileno, Punta del Este, arroyo Maldonado y subsuelo de la costa de la Ballena a José Ignacio) y fillitas (La Pedrera y La Paloma).

Figura 2.6 - Filitas encontradas en la playa La Pedrera en el arco La Paloma-La Pedrera

Tanto el zócalo del Río de la Plata como el del Este están compuestos por rocas muy poco erosionables, por lo que su importancia para el estudio de la costa no está dada por aportes de sedimentos a las playas, sino por servir de puntos fijos que condicionan la forma, dirección y dimensión de las mismas. En particular Zócalo del Este aflora como puntas que se introducen en el mar y que delimitan las playas adyacentes en Punta Ballena, José Ignacio, La Paloma, La Pedrera, Cabo Polonio, Barra de Valizas, Punta Palmar, Punta del Diablo y Punta del Barco. Conformando límites naturales de las grandes playas que constituyen la costa este del Uruguay. Por otro lado si bien no afloran

actualmente en las cercanías de la costa, sirven como base para las formaciones más recientes que se encuentran depositadas encima.

2 Piedras de Afilar:

Está constituida por rocas sedimentarias (areniscas, lutitas y conglomerados) fuertemente alteradas, con algunos rasgos de metamorfismo, que afloran en fajas asociadas a los cursos superiores y medios de los arroyos del Bagre, La Tuna y La Coronilla. Es posible que la erosión que estos cuerpos de agua le causan a esta formación produzca un cierto aporte de sedimentos a las playas.

3 Formación Sierra de la Ánimas:

Esta formación se encuentra acotada a la zona comprendida entre Punta Rasa y el arroyo Solís Grande. Está constituida por rocas magmáticas neutras o básicas, como las traquitas, las riolitas y en menor medida sienitas y granitos. El afloramiento continental es muy extenso, sin embargo hacia la costa aparece asociado a la formación Zócalo del Este, determinando junto con ésta la costa de la zona en la que aflora.

4 Formación Fray Bentos:

Aflora en muy pocos lugares, sirviendo más bien como base para que se apoyen otras formaciones más recientes. Desde el punto de vista granulométrico está compuesta por sedimentos limo arenosos homogéneos.

5 Formación Raigón:

Esta formación está compuesta por arenas, areniscas y limo arcillas que le sirven en ocasiones de matriz. Tienen la particularidad de presentar tres unidades claramente identificables en todos sus afloramientos. En la base presenta arenas y areniscas muy poco consolidadas, de grano fino, mal seleccionado, de color gris claro. Encima de éstas se encuentran arenas friables con distintas estratificaciones, de grano entre 0.2 a 3 o 4 mm, de buena a moderada selección. Su composición es feldespática o arcosa. Si bien mantiene un color característico, presenta franjas teñidas de colores rojizos por la presencia de óxido de hierro. La unidad superior está constituida por arenas y areniscas mal seleccionadas, arcósicas, masivas y friables, de colores variables blanquecinas o amarillentas. Estas arenas son sostenidas en una matriz limo arcillosa. Dentro de esta unidad se presenta estratificación gradada, con granos más gruesos hacia la base, cambiando también el color, pasando del gris claro a marrón en la zona superior, en donde los granos de arena son más finos y la presencia de la matriz limo arcillosa se hace más importante. Las características particulares de esta formación y su importante potencia hacen que sea fácilmente erosionable por los agentes atmosféricos, formando cárcavas en donde cursos de agua transitorios logran arrastrar los sedimentos hacia las playas, constituyendo uno de los aportes más importantes de sedimentos a estas.

6 Formación Vizcaíno (o Villa Soriano):

Formada por arcillas negras o grises muy oscuras, con abundante fauna de moluscos. Este tipo de sedimentos solo puede originarse en un ambiente de sedimentación de aguas frías con profundidades inferiores a los 15 metros. Los hallazgos hechos a distintas alturas en distintas zonas del país son concordantes con los movimientos tectónicos del Cenozoico.

8 Formación Chuy:

Está compuesta principalmente por arenas, arcillas y lodolitas. Se presenta con ínter estratificación arrítmica entre los términos que la componen y que forman capas de 0.5 a 2 metros. En las zonas superiores son más frecuentes las capas de arena, mientras que en la base las compuestas por arcillas. Las arcillas presentan arena y gravilla dispersas, son masivas medianamente friables y de color gris, gris verdoso o verde, aunque es frecuente la aparición de colores rojizos o amarillos debidos a óxido de hierro y tonos pardos en la parte superior de las capas. En la zona arcillosa es frecuente encontrar una gran cantidad de concreciones de hidróxidos de hierro y de carbonato de calcio. Las capas de arena se presentan de forma masiva, compuestas de arenas finas a medias, subredondeadas, feldespáticas, en una matriz arcillosa poco abundante. El color en general es amarillento a rojizo con mayor intensidad del gris cuando la matriz arcillosa se hace más abundante. En la parte superior se forman láminas producto de la ferrificación que resisten mucho más la erosión que el resto del conjunto, quedando muchas veces expuestas cuando las arcillas y las arenas han sido erosionadas. Esta formación alcanza en algunas zonas (Chuy y José Ignacio) potencias de hasta 25 metros, por lo que es la fuente más importante de arenas para esas playas.

Estos sedimentos se han acumulado en un ambiente continental. Los niveles arcillosos son seguramente subacuáticos; las arenas podrían ser además de acuáticas eólicas. Las arcillas parecen haberse depositado a partir de aguas sumamente cargadas, con escasa posibilidad de selección. Estas características concuerdan con un ambiente lagunar marginado (y a veces cubierto) por dunas. Todo el conjunto evidencia una secuencia continental litoral, depositada progresivamente durante la regresión en la que se conformó Vizcaíno.

9 Formación Libertad:

Esta formación aparece como un manto discordante que cubre las unidades anteriores adaptándose a la geografía local. Se presenta en casi toda la costa ocupando zonas muy reducidas. Está compuesta por lodolitas masivas de color pardo, muy desagregables; si bien esto hace muy probable que ante la erosión buena parte de esta formación (que en algunos lugares llega a tener más de 5 metros de potencia) llegue a las playas, por ser de una granulometría tan fina, es difícil que sean retenidas en las costas.

10 Cordones litorales, playas y médanos antiguos:

Son formaciones de arena gruesa y muy gruesa cuya selección es regular, dispuestas en estratos de diferente granulometría. Presentan restos de valvas de moluscos rotas o enteras en estratos lenticulares. Se presentan en algunas zonas de la costa (en particular en las lagunas Garzón y de Rocha) como dos cordones delgados que se superponen, dando lugar a un cordón mayor que puede llegar a estar a 10 metros por encima del nivel actual del mar. En varios puntos de la costa se encuentran también playas antiguas muy alejadas de la costa actual (a más de 500 metros) y a 2 o 3 metros sobre el nivel actual del mar. Estos depósitos terminan a más de 1200 metros en antiguas barrancas. También se encuentran zonas de médanos total o parcialmente edafizados, y muchas veces erosionados.

Tanto las playas como los cordones litorales alejados de la costa actual son vestigios de una línea de playa antigua, bastante más avanzada que la actual. Esto concuerda con lo señalado con anterioridad acerca de las ingresiones y regresiones del cenozoico y en particular con la última regresión del Holoceno. Los médanos antiguos son contemporáneos con las playas antiguas y con la formación de los cordones litorales, por lo que probablemente hayan sido constituidos en esas condiciones de mar crecido.

En la lámina 2.7. se representan las formaciones que afloran en la zona de estudio.

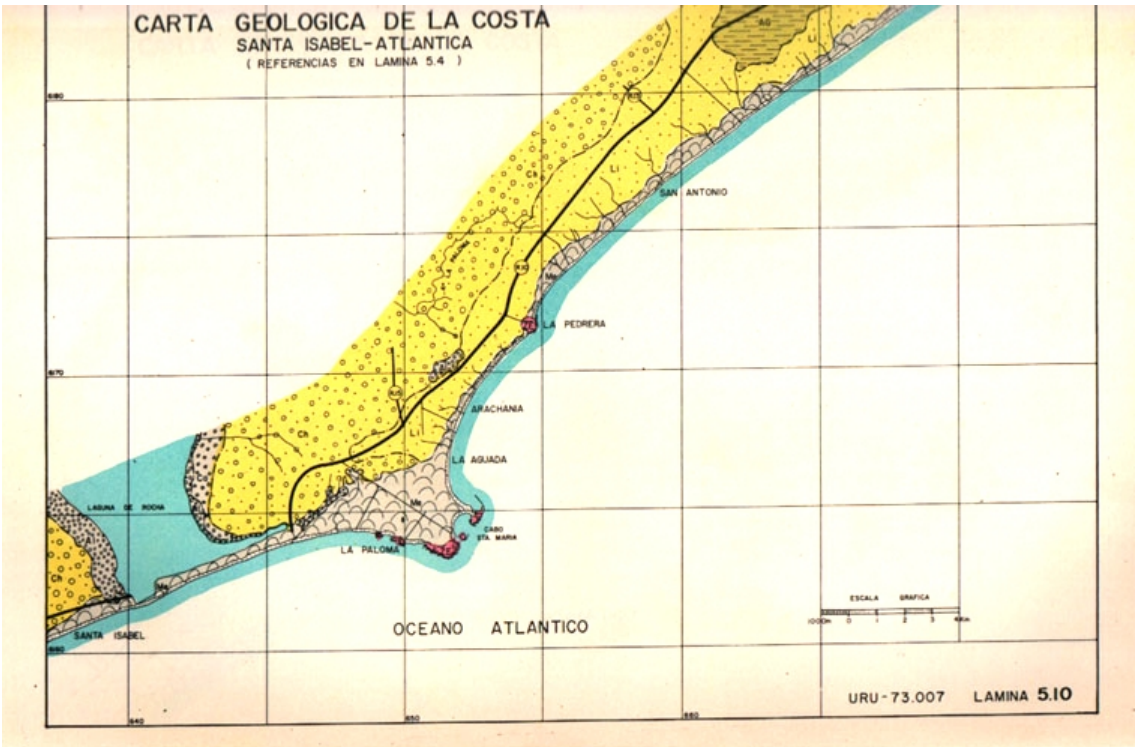


Figura 2.7 - Carta Geológica de la Costa. Extraído de MTOP (1979) Conservación y mejora de playas

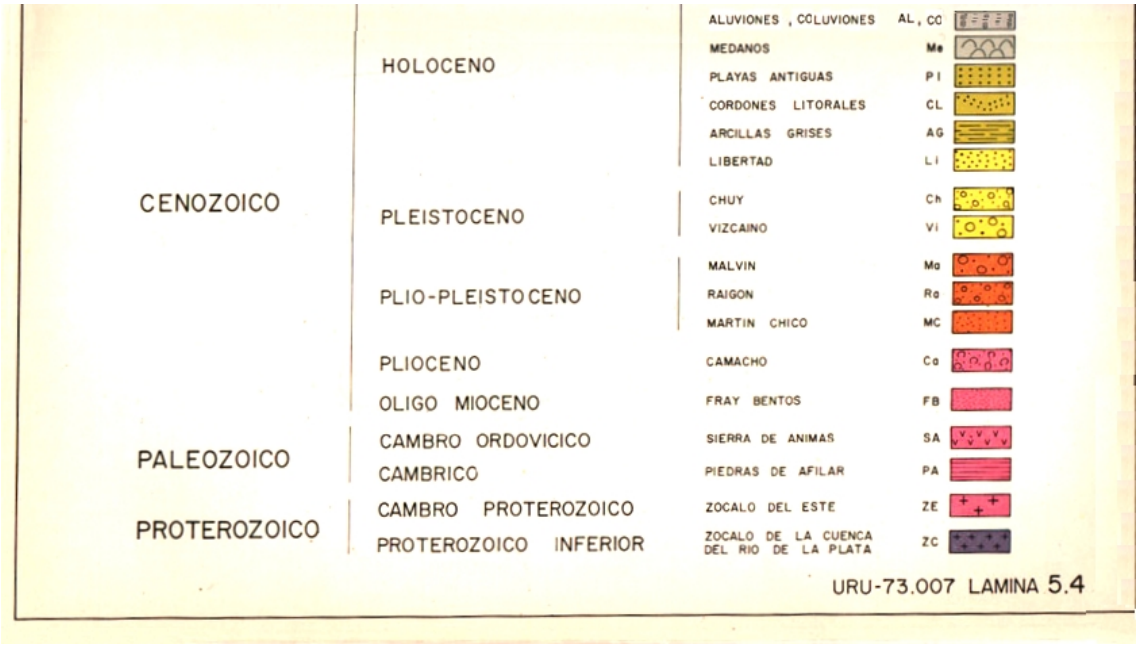


Figura 2.8 – Referencias de la figura 2.7. Extraído de MTOP (1979) Conservación y mejora de playas

2.4.3. Geología y mar

Como se ha señalado anteriormente, durante el Cenozoico se han dado una serie de cambios en el nivel del mar. Estos ciclos ingresivos regresivos tuvieron gran incidencia en la conformación de la zona de la costa actual y de los sedimentos que constituyen el fondo del Río de la Plata. En esta sección se describen someramente estos eventos y se señalan algunas conclusiones al respecto del nivel actual del mar.

a) Historia geológica del Cenozoico

El terciario está formado por sedimentos característicos de ambientes neríticos y marginales. Subsecuentemente y costa adentro, estos gradan en estuarios de baja energía y finalmente en continentales. Esta es la primera aparición de sedimentos marinos en la región.

Durante el Oligoceno y el Mioceno inferior predominan costa adentro las facies continentales (formación Fray Bentos) y sólo hacia la zona de plataforma se observan facies neríticas y deltaicas con un espesor superior a los 1000 metros.

Durante el Mioceno Superior tiene lugar una nueva ingresión que ocupa toda la cuenca Terciaria. El espesor de estos sedimentos varía entre los 500 y los 1000 metros.

En el Plioceno se produce otra transgresión cuyos miembros superiores desarrollan un espeso y difundido manto arenoso conocido bajo el nombre de Puelchense o “arenas basales”. Así se forman numerosos arcos de playas, cordones litorales y depósitos bioclásticos y calcáreos que alternan con limos arcillosos lagunares y estuáricos (formación Camacho).

Costa afuera del Uruguay, el Terciario yace sobre el basamento cristalino, con un espesor del orden de los 500 metros. Así su máximo desarrollo sólo sería en la Cuenca del Este y del Salado.

Sobre el litoral Atlántico no se observan afloramientos de esta edad, por lo que se supone que los sedimentos allí han sido escasos o erosionados en su totalidad. Es posible que estos sedimentos hayan sido arrastrados y retrabajados por el mar mezclándose con las arenas más recientes presentes en la playa actual.

b) Historia geológica del Pleistoceno

El cuerpo arenoso basal (o arenas Puelches) marcan una transición entre la trasgresión marina Terciaria Paranaense y el Cuaternario. Estos sedimentos son progresivamente sustituidos durante el Pleistoceno por sedimentos pertenecientes a la formación Libertad y Raigón; estos últimos son sedimentos limo arenosos continentales de color pardo rojizo de origen fluvial eólico con apariencia de loess.

Aparentemente durante el Cuaternario las transgresiones marinas no han tenido mayor desarrollo costa adentro; todo indica que se han limitado a la región de la plataforma continental. Al interior solo se extendieron ocupando áreas deprimidas, es decir planicies costeras y fluviales, como es el caso del Río de la Plata.

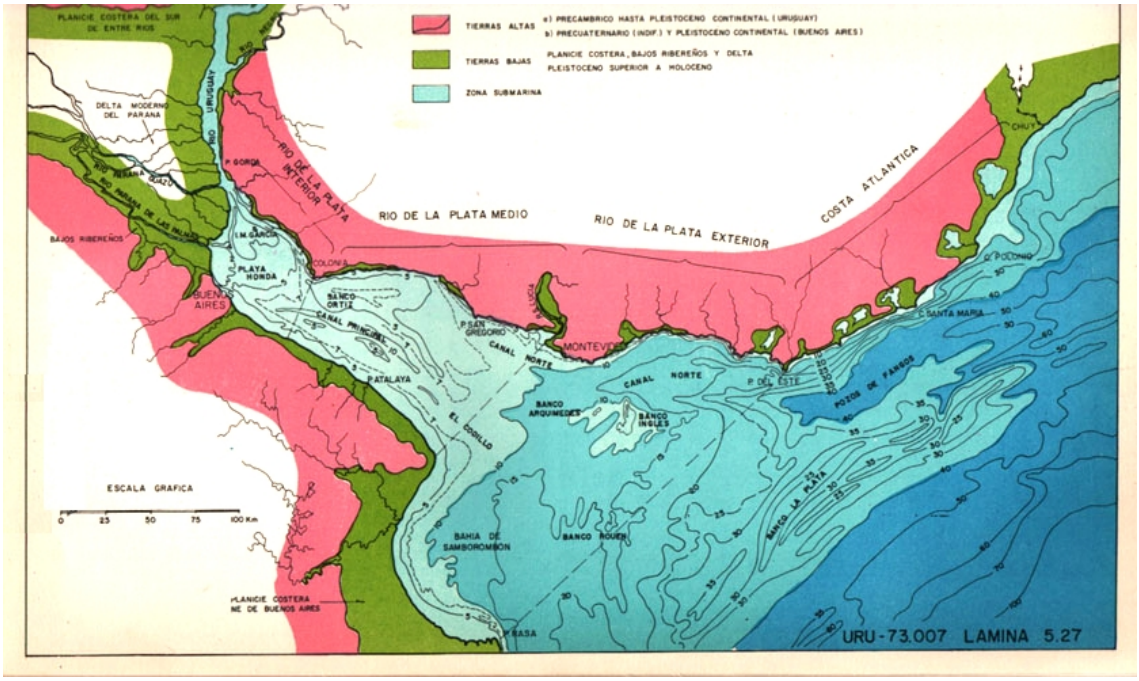


Figura 2.9 – Clasificación de zonas bajas y altas. Extraído de MTOP (1979) Conservación y mejora de playas

El Belgranense sería la ingresión marina más importante en el Pleistoceno, ya que llegó a penetrar en el valle fluvial hasta llegar a las proximidades de la ciudad de Rosario-Argentina. A pesar de esto no penetró en la margen oeste del río Uruguay más allá de lo señalado anteriormente.

c) Historia geológica del Holoceno

El Holoceno comienza entre los 13000 y los 12000 años A.P. (antes del presente) y está marcado por un cambio climático y el ascenso definitivo del mar hasta alcanzar los niveles actuales. En la región esta estabilización se habría dado entre los 6000 y los 4000 A.P. En la plataforma continental hay claros indicios que permiten marcar los niveles relativos del mar, es decir el progreso de la última transgresión marina.

El proceso que se describe comenzó cuando el nivel del mar se encontraba en aproximadamente -150m del nivel actual, en el borde de la plataforma continental. Desde este punto y con relativa celeridad se produce un ascenso intermitente, con estabilizaciones (que permitieron subsecuentes depositaciones) y oscilaciones que generaron formas erosivas y constructivas.

Es así que se constatan los siguientes episodios:

Previo a 16000 años A.P.
Entre 12000 y 8000 años A.P.
Entre 8000 y 6000 años A.P.
Desde 6000 años A.P. al presente.

1. Estado prévio a 16000 años A.P.

El nivel del mar se hallaba a aproximadamente -150m existiendo así una extensa planicie costera sobre la que se desarrolló un sistema de ríos de llanura con sus correspondientes fajas meandrosas, lagunas y bañados. La mayoría de estos ríos construyeron deltas y muchos de ellos alcanzaron el borde de la plataforma continental e incluso se conectaron con cañones submarinos.

2. Entre 12000 y 8000 años A.P.

El mar comienza el ascenso produciéndose la migración lateral de la línea de costa. Hacia fines de este intervalo se produce una estabilización del nivel del mar que permite la construcción de un complejo de isla barrera (Banco La Plata) y cierra parcialmente la bahía del Plata forzando al río a desaguar más al norte.

3. Entre 8000 y 6000 años A.P.

El mar invade el resto de las tierras bajas y valle del Río de la Plata. Se crea así en el Uruguay un sistema de bahías poco profundas con un ambiente predominantemente salobre. En el interior de las bahías se forman cordones y niveles de playas elevados. Habría luego una estabilización del nivel del mar que favorece la formación de barras y espigas, comenzando así el cierre de las bahías del Uruguay y formación de la isla de Río Grande do Sul.

Los canales del estuario del Plata están en franca fase regresiva y posteriormente son ahogados por el continuo avance del nivel del mar. Las condiciones hidráulicas fluviales desaparecen casi por completo en la zona del río exterior y área nerítica interna.

En el litoral se desarrolla una alternancia de fases erosivas-constructivas, desarrollando campos de dunas que contribuyen a engrosar el cordón arenoso costero.

4. Desde 6000 años A.P. hasta el presente.

Hay una estabilización del nivel del mar que crea una microbase regresiva. La costa se transforma entonces en costa de acreción con el desarrollo de barras, cordones de playas y campos de dunas bajo condiciones similares a las actuales.

Debido al incremento de la pluviosidad en la cuenca del Plata hay un aumento del caudal que transporta, haciendo retroceder el ambiente salobre.

El Río de la Plata inicia su fase acrecional, se desarrolla el delta del Paraná y las facies fluviales avanzan traslapando las antiguas fases transgresivas arenosas del río exterior. Sobre el litoral Atlántico los arroyos procuran ajustarse al nuevo nivel de base, aumentando así la erosión de los depósitos cuaternarios costeros.

Durante los últimos milenios, el mar y las condiciones climáticas sufren cambios o alteraciones seculares que producen ciclos alternados erosivos y constructivos. Esto se debe al movimiento de los centros climáticos que producen cambios en la dirección y energía de los vientos y olas. Esto crea alteraciones en el régimen hidráulico costero que crea cambios cíclicos en las características de las playas. Es así que por épocas hay un exceso o defecto en el balance de arenas costeras según sean las características y energías de los trenes de olas que convergen sobre el litoral, pero que a la larga, en general, permanecen retenidas en la playa y playa submarina (MTOP, URU.73.007 1980).

Como se señalaba anteriormente el nivel del mar depende de dos efectos que se superponen. El nivel isostático, que depende de la actividad tectónica que hace ascender o descender las placas tectónicas produciendo variaciones regionales; y el nivel eustático, que depende del volumen total de agua disponible en los océanos y que está condicionado principalmente por el deshielo de los glaciares.

Es así que en términos generales, a una escala global, puede verificarse que el nivel eustático ha ido creciendo en los últimos 5000 años a una tasa de 1cm cada 100 años; sin embargo, en esta región, hay evidencias de líneas de costa anteriores a este período que se encuentran a más de 5 metros sobre el nivel de costa actual. Esto hace pensar que los efectos isoestáticos no sólo han compensado el ascenso general del mar, sino que lo han superado. Esto se corresponde con la existencia de una fuerte actividad tectónica en la zona, detectada a través de métodos gravimétricos (L. Teixeira “Littoral Processes in a Prograding Coast”).

Por otro lado Martín y Suguio determinaron una curva de oscilación del nivel del mar para los últimos milenios, para tres zonas del Brasil.

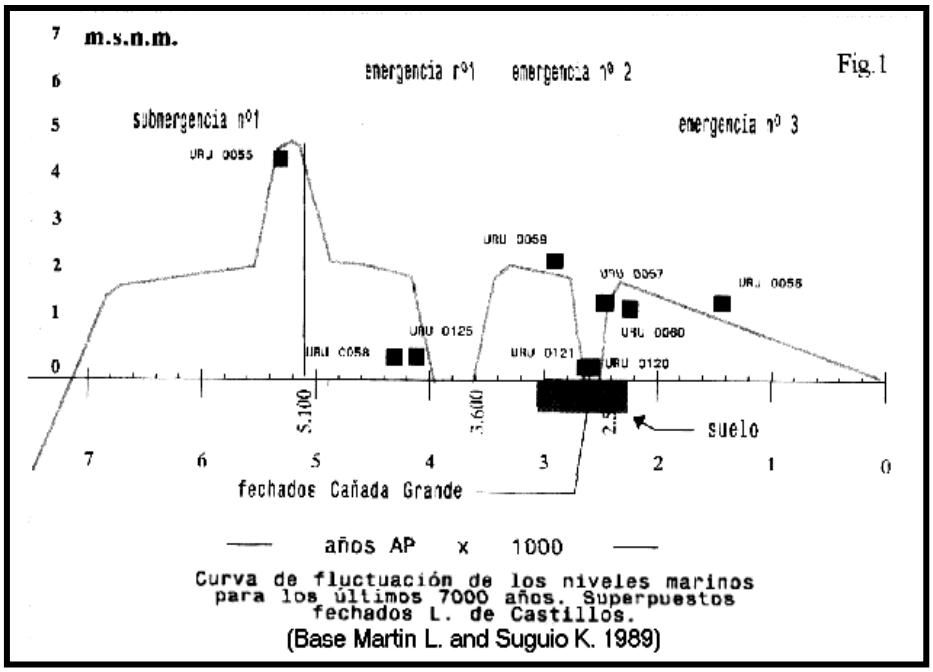


Figura 2.10 - Oscilación del nivel del mar para los últimos milenios. Extraído de Revista do Museu de Arqueología e Etnologia Nº8 Universidad de Sao Paulo

Estudios posteriores de Bracco y Ures, a través de estudios de Carbono 14 aplicados a restos de moluscos, carbón y madera presentes en muestras tomadas en distintos puntos de la costa este y sur, así como del río Uruguay, constataron la aplicabilidad de los resultados de Martín y Suguio al territorio Uruguayo.

De todo esto puede concluirse que en esta región el nivel relativo del mar está decreciendo, con una taza media de 1mm por año. De hecho en fotos aéreas puede apreciarse un avance de la línea de playa, paralela a la línea de costa actual y perpendicular al flujo de energía neto. (L. Texeira "Littoral Processes in a Prograding Coast").

d) Sedimentos modernos

Como consecuencia de las evoluciones descritas anteriormente los sedimentos modernos de la región presentan una distribución textural sumamente variada pero con definidos tipos mineralógicos. Ello se debe a las diferentes fuentes proveedoras de sedimentos y a los agentes de transporte que actuaron, en particular durante el Holoceno.

En el Río de la Plata interior y medio la distribución sedimentaria varía desde arenas finas y limos en la plataforma perideltaica del Paraná hasta limos y arcillas limosas en el banco del río medio (Banco Ortiz).

En el río exterior y el "canal del Norte" llama la atención un arco de sedimentos pelíticos con características plásticas (fangos), que se extiende contorneando casi paralelamente a la costa uruguaya atlántica hasta llegar a Río Grande do Sul. Estos sedimentos fueron originalmente transportados por el Río de la Plata en su prolongación sobre la plataforma continental media. En un corte puede

verse como un canal o “Pozo de Fango”, que impide o dificulta el mezclado de los sedimentos de un lado y otro del mismo.

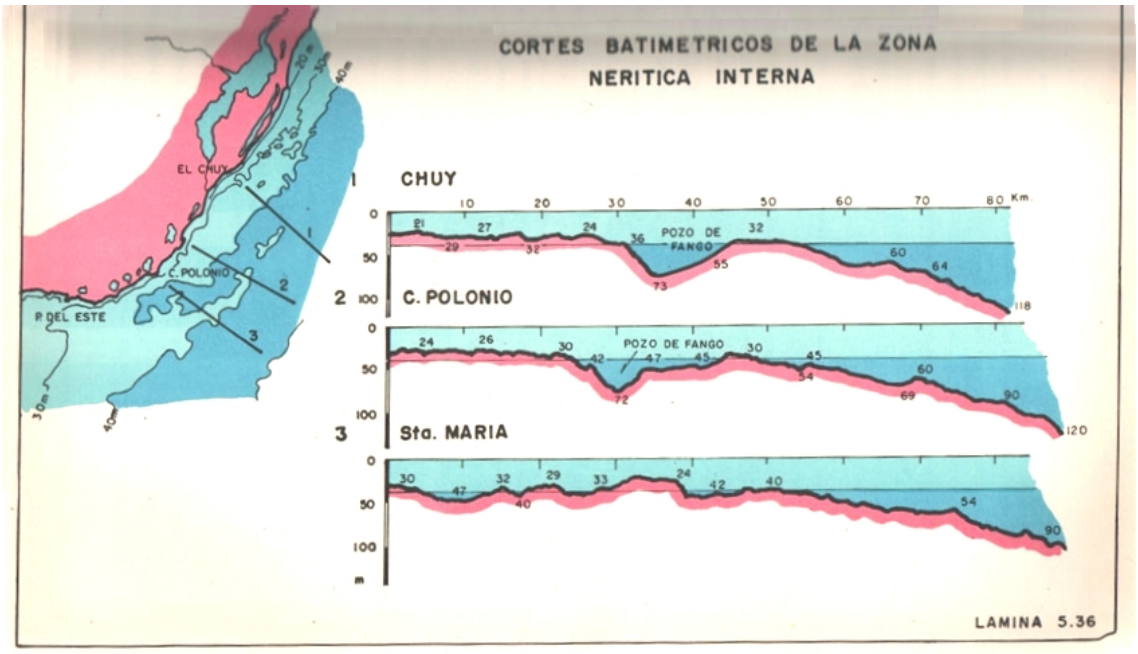


Figura 2.11 - Corte en tres puntos diferentes de la costa Atlántica uruguaya. Extraído de MTOP (1979) Conservación y mejora de playas

En el litoral y zona nerítica interior en contraste con estos sedimentos, se observa un cinturón arenoso (“arenas costeras”) que se ensancha progresivamente hacia el norte a partir de la punta de José Ignacio. Estas arenas pertenecen a una serie reciente, esto quiere decir que, si bien su origen es antiguo, son transportados y depositados en la actualidad fluvialmente. Esto no quiere decir que sean transportadas por el río, sino que son producto de la erosión costera y del retrabajamiento de los sedimentos en la zona litoral.

Más al este, ya sobre la plataforma continental media y exterior, y al sur, penetrando en el Río de la Plata exterior, hay un amplio campo de arenas sumamente uniforme. Estas arenas son relictos de sedimentos costeros esparcidos sobre la plataforma, que provienen del sur de Buenos Aires. Por haber sido depositadas en tiempos muy anteriores (durante una regresión del nivel del mar) se les llama Arenas Antiguas.

Como se ve en la figura 2.12 ambas series están separadas por la lengua de sedimentos finos fluviales.

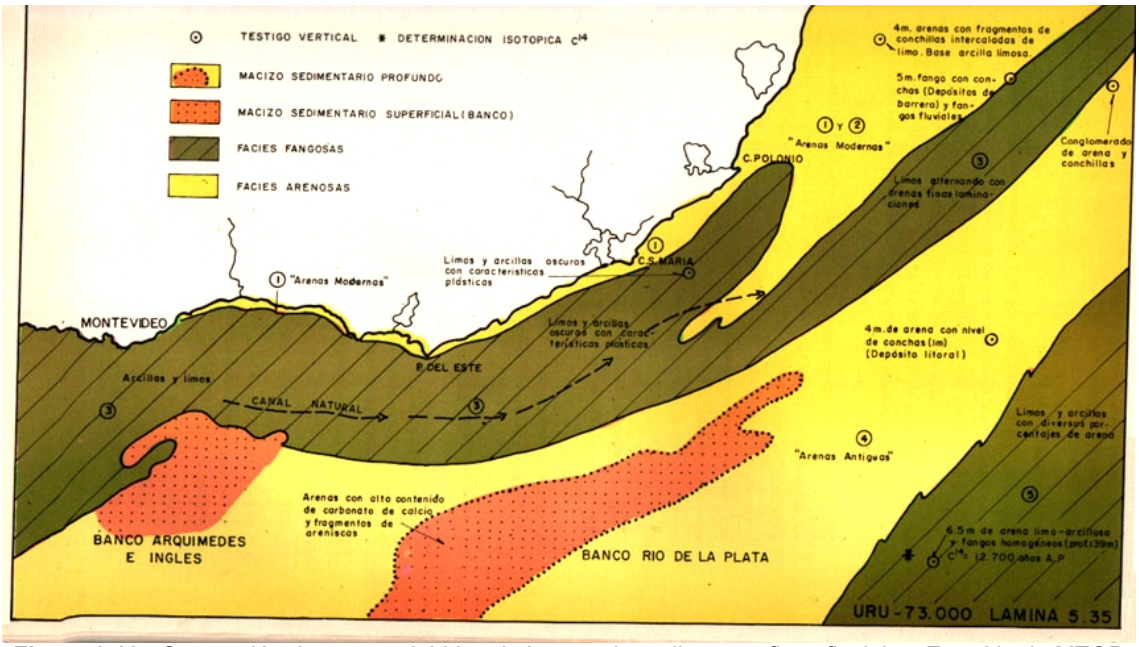


Figura 2.12 - Separación de arenas debido a la lengua de sedimentos finos fluviales. Extraído de MTOP (1979) Conservación y mejora de playas

Las arenas recientes pueden subdividirse en dos grupos, las de la costa del Río de la Plata y las de la Costa Atlántica. Las primeras cubren una angosta faja costera y son en general arenas medias, mal seleccionadas, con diámetros medianos de 0.15 a 0.40mm, ricas en cuarzo, turmalina, epidota monacita, granate, circón y rutilo, componentes típicos de rocas ácidas cristalinas. Las de la costa Atlántica se extienden abriéndose en abanico hacia el norte. Son arenas más gruesas, con una selección de moderada a pobre, con un diámetro mediano de 0.2 a 1mm. El cuarzo y el feldespato siguen siendo los minerales predominantes livianos, y entre los pesados abundan epidota, turmalina, granate y circón, mineralogía ésta proveniente de rocas ígneo-ácido y metamórficas.

Las arenas antiguas tienen una textura de arena fina con porcentajes superiores al 80 o 90%. En algunas zonas hay concentraciones de fragmentos calcáreos y de conchas que le dan textura conglomerádica. El diámetro medio de la arena es de 0.2 a 0.6mm y la selección del material es de buena a muy buena (lo que es indicio de un gran “retrabajamiento”). Los minerales livianos predominantes son plagioclasa, vidrio volcánico y fragmentos líticos (pastas volcánicas); los minerales pesados más característicos son hipersteno, augita y hornblenda, pero en valores menores al 8%. Estos componentes minerales provienen de rocas básicas. Se las conoce como serie Pampeana o Patagónica. Estas arenas comenzaron a ser depositadas hace 35.000 años, lo que implica que han sido depositadas durante el Pleistoceno, y que han sido muy retrabajadas por la trasgresión Holocena.

2.5. Geomorfología de la costa sureste de Uruguay

2.5.1. Elementos geomorfológicos

Las condiciones geológicas descriptas anteriormente dieron origen a distintos elementos geológicos que pueden clasificarse en los relacionados con acciones marinas y litorales, como las barrancas, los depósitos litorales y prelitorales y las lagunas litorales; las acciones continentales, como las unidades eólicas, fluviales, de interfluvios y relictuales; y por último las playas actuales. Sobre estas últimas se hará mayor hincapié por ser de mayor importancia para el estudio en cuestión.

2.5.2. Acciones marinas y litorales

a) Taludes o barrancas

Existen taludes y barracas a lo largo de casi toda la costa. No se presentan de modo continuo, sino en tramos interrumpidos. Estas barrancas se han excavado en las capas sedimentarias de las formaciones Raigón (hacia el oeste) y Chuy (en el este). Si bien su altura puede variar, con frecuencia alcanza los 10 a 12 metros. En su parte superior suele presentarse un plano estructural de edafización, muy constante a lo largo de la costa.

Estas formaciones ocurren en cuatro posiciones diferentes:

- Recostadas a las playas actuales y sometidas a la acción erosiva marina más o menos acentuada.

- Paralelas a la línea de costa actual pero alejadas de ella centenares de metros, por lo que no son alcanzadas en ningún momento por las mareas actuales.

- Marginando las lagunas litorales en la costa Atlántica.

- Marginado las grandes cárcavas y superficies erosionadas.

Las barracas alejadas de la costa actual se encuentran degradadas por el proceso de erosión continental, pero en muchos casos tienen una clara expresión en el paisaje. Se ha interpretado a estas barracas como el producto de erosión marina litoral, en épocas en el que el nivel del mar era más alto que el actual. Representando así, de modo aproximado, antiguas líneas de costa.

Las barrancas que se encuentran marginando parte de algunas de las lagunas de la costa Atlántica ofrecen características similares, en cuanto a su altura y forma, a las que actualmente se forman por acción marina, habiendo quedado como relictos de procesos erosivos ocurridos cuando eran golfos o estuarios ocupados por el mar con un nivel más alto que el actual.

Los materiales que se desprenden de todas estas barracas, sobre todo cuando se trata de las inmediatas a las playas, son desintegrados por la acción

conjunta de las olas y de la lluvia. De ese modo la fracción arena queda incorporada al ambiente costero. Estas barracas serían entonces una fuente importante de materiales para las playas.

b) Depósitos litorales y prelitorales

En la costa uruguaya aparecen claros ejemplos de depósitos litorales antiguos y actuales. Los cordones antiguos están formados por la acumulación de arenas costeras dejadas por el nivel del mar en retroceso en un pasado inmediato. Su estructura es visible en fotografías aéreas: están formadas por numerosas capas superpuestas apoyadas una sobre otra en forma sucesiva, lo que indica que cada una de ellas constituyó la línea de costa en un momento dado.

Esa acumulación costera dificulta el drenaje superficial de las aguas continentales hacia el mar, las que se ven represadas y forman lagunas o bañados.

Los cordones actuales (barras litorales) se forman en las desembocaduras de los arroyos. En general crecen hacia el Oeste en la costa Platense, hacia el WSW en el tramo Atlántico comprendido entre Punta del Este y La Paloma, y hacia el NE entre este punto y la costa brasilera. Ello se explica por el ángulo de incidencia de la resultante a largo plazo de las olas de mayor energía de cada una de estas zonas, si bien el transporte eólico, conocido localmente como “arenas voladoras”, y sobre todo los grandes temporales marinos, pueden modificar e incluso invertir temporalmente esta tendencia.

Los depósitos prelitorales, se formarían en zonas nodales de interferencia entre las olas incidentes y reflejadas. Su disposición es variable y su existencia efímera debido a la irregularidad de los estados del mar; pero se observa que tienden a formarse con notable perseverancia en los mismos puntos de la costa y con el mismo aspecto, lo que indicaría tendencias estacionarias en períodos de tiempo suficientemente largos.

c) Lagunas litorales

Estas lagunas son características de la región Atlántica, salvo la Laguna del Sauce que se encuentra en la zona exterior del Río de la Plata. Todas ellas representan antiguos golfos de la costa que ocupan áreas deprimidas en el Cuaternario. Estos golfos, por la intensa acumulación de depósitos litorales (barras y cordones de playa) han quedado aislados o casi aislados del ambiente marino.

Ya se ha mencionado que los cordones litorales antiguos y las barrancas asociadas en el interior de estas lagunas son el resultado de procesos aluviales ocurridos con un nivel del mar más elevado que el actual. En el caso de las lagunas que se encuentran totalmente cerradas, el nivel de sus aguas es superior al del mar.

A causas de la presencia de estas lagunas y bañados, gran parte de los materiales sólidos transportados por los arroyos principales no llegan al mar. Los bañados y las lagunas actúan así como trampas de sedimentos que limitan el aporte continental hacia la zona costera.

2.5.3. Acciones continentales

a) Unidades eólicas: Médanos

A lo largo de casi toda la costa existe una franja casi ininterrumpida de médanos. Los mismos se forman a expensas de las arenas extraídas de las playas inmediatas por la acción de los vientos dominantes. Los médanos actuales se presentan en forma de cordones múltiples separados por ollas de deflación. Además de los medanos actuales, existen depósitos idénticos pero más antiguos. Una de las características de reconocimiento de estos últimos es que se hallan fijados por una cobertura vegetal continua, e incluso modelados por la erosión.

En varios lugares en los que la vegetación es escasa o existen fenómenos erosivos que han recortado los médanos más antiguos, resulta imposible diferenciar ambas generaciones.

La extensión de los cordones de médanos a lo largo de toda la costa así como la presencia de grandes extensiones de campos de médanos fosilizados, indican que en las playas de la región existen procesos de erosión eólica muy importantes, compensados en la mayor parte de los casos por aportes igualmente considerables. Parte de los materiales erosionados por el viento regresan a las playas, ya sea por la acción del viento (como sucede en Cabo polonio) o porque las arenas eólicas son retomadas por los cursos de agua y transportados hacia el mar (arroyos Pando y Solís Chico, por ejemplo).

Como conclusión debe destacarse que la presencia de médanos diversos constituye el rasgo geomorfológico más característico de la parte continental de la faja costera.

b) Unidades fluviales: llanuras aluviales

Las llanuras aluviales pueden estar asociadas a cursos de agua permanentes o transitorios. Los primeros limitan los aportes fluviales hacia la costa, ya que permiten la expansión de los cauces reteniendo buena parte de la carga fluvial. Si bien los cursos no permanentes tienen una extensión limitada son una fuente importante de sedimentos a la costa debido a que su acción erosiva produce cárcavas.

Se distinguen también zonas llanas favorables a la acumulación de las aguas de escurrimiento superficial. Estas se encuentran frecuentemente inundadas y son estados intermedios entre las llanuras aluviales y las lagunas.

c) Unidades de interfluvios y procesos asociados

En el tramo comprendido entre las lagunas Garzón y de Rocha, así como al NE de La Paloma, se desarrollan grandes cárcavas. Estas cárcavas no son solamente profundos entalles más o menos lineales, sino que alcanzan una gran superficie, abriéndose en abanico o en forma de árbol. Sus paredes son barrancas casi verticales y el fondo tiende a ser plano. En numerosos puntos se encuentran vestigios de una colmatación parcial, luego vuelta a hendir por nuevas etapas erosivas.

Las causas de estos fuertes procesos de erosión son complejas, pero deben señalarse como principales:

-extrema friabilidad de los sedimentos
-fuertes discontinuidades internas de permeabilidad
-vecindad de barrancas litorales
-humidificación del clima, con aumento de la intensidad de lluvias
-proximidad frecuente del sustrato cristalino
-acción del hombre (trazado de caminos, cunetas, urbanización en general)

Algunas de estas cárcavas, que se extienden hasta la costa, aparecen vinculadas a puntas sumergidas o barras arenosas, compuestos por los materiales erosionados en las cárcavas y transportados por la acción fluvio-pluvial. Estas puntas o barras son efímeras, formándose a continuación de grandes lluvias y desapareciendo paulatinamente a causa de los fenómenos de transporte litoral.

d) Unidades planas de origen relictual

La estructura geológica tabular de las capas sedimentarias de la formación Chuy determina planicies por encima del nivel de base de la región. La escasa pendiente y la baja permeabilidad de los niveles arcillosos que se encuentran por encima, causan que estas regiones tengan dificultades de drenaje.

2.5.4. Playas actuales

Desde el punto de vista geológico, la playa es un medio ambiente de sedimentación que se caracteriza por sus dimensiones (ancho y largo), por su forma (rectilínea o curva), por su pendiente, por los materiales que la componen (granulometría, composición mineralógica) y por la energía del oleaje que actúa sobre los materiales disponibles.

a) Dimensiones y forma

Las playas se encuentran en equilibrio cuando no existen cambios sustanciales permanentes en su forma y dimensiones o en su composición. La condición de equilibrio en general es dinámica y depende de las características de las olas incidentes (dirección y energía), la forma de la costa y la cantidad y calidad de las arenas disponibles. Es así que si ninguna de estas características cambia no es esperable que se produzcan modificaciones

estables en la misma, más allá de las oscilaciones propias de este sistema. Cabe destacar que más allá de que en líneas generales una playa no haya cambiado significativamente, puede suceder que localmente, en ciertos lugares de la misma, se estén produciendo eventos erosivos o constructivos debidos a acciones puntuales en las cercanías.

En la costa este del Uruguay las playas se extienden en un tramo de costa superior a los 300km, con interrupciones producidas por desembocaduras de arroyos y por la presencia de puntas rocosas. El ancho de la faja costera varía entre los 30 y 250 metros.

La forma de las playas es rectilínea o curva, con concavidad vuelta hacia el mar. Las playas curvas pueden ser simétricas o asimétricas (es decir que uno de los extremos presente una curvatura más acentuada que el otro). En general en este caso están limitadas por puntas rocosas resistentes que interrumpen el transporte de sedimentos y originan su acumulación.

Según las formas, dimensiones y orientación predominantes de las playas pueden distinguirse a lo largo de la costa varias zonas:

- Entre Punta Brava y el arroyo Carrasco, las playas son de poca longitud, arquedas y simétricas (Pocitos, Buceo, Malvín, Playa Honda y Playa Verde), separadas por puntas rocosas.

- Entre Carrasco y el arroyo Solís Chico las playas comienzan siendo rectilíneas hasta El Pinar, luego se vuelven ligeramente curvas acentuándose la curvatura hasta llegar a Atlántida; a partir de allí vuelven a ser rectilíneas. La orientación de la línea de costa tiende a variar gradualmente de Oeste a Este (N55ºE en Lagomar, hasta N65ºE en Las Toscas).

- Desde el arroyo Solís Chico hasta Punta Rasa la costa presenta una sucesión de playas en forma de arco. Las longitudes están comprendidas entre los 200 metros y los 9 kilómetros, siendo mucho más numerosas estas últimas. Esta zona se puede dividir en dos partes según la orientación de la línea de costa: la primera, comprendida entre los arroyos Solís Chico y Grande, tiene una orientación general N80ºW – S80ºE y la curvatura de los arcos de playa es más acentuada en el extremo Este. La segunda parte se extiende desde el arroyo Solís Grande hasta la punta Rasa, y su orientación en grandes líneas es N45ºW – S45ºE; los arcos de las playas son simétricos.

- Desde Punta Rasa hasta Punta del Este existen solamente tres grandes playas, en forma de arcos muy abiertos hacia el mar. Están separadas por las puntas Ballena y del Chileno. La primera de esas playas tiene una orientación general Este-Oeste y unos 17km de extensión. La segunda mantiene esa orientación, pero solo tiene 2.5km de largo. La tercera playa tiene unos 8km de largo, con una orientación general N60ºW – S60ºE.

-Desde Punta del Este a Cabo Polonio la costa tiene aspecto rectilíneo, con rumbo general constante N60ºE. Todo el tramo completo tiene una longitud del orden de los 120km y está separado por puntas rocosas pequeñas o más

importantes como las de José Ignacio, La Paloma o La Pedrera. En este tramo se produce el cambio de la asimetría de los arcos de playa. Hasta La Paloma las curvas más cerradas se encontraban en el extremo Este; a partir de esta localidad, las playas tienen al Oeste su extremo más curvado.

- En los alrededores de Santa Teresa existen una serie de puntas rocosas que limitan varias playas relativamente pequeñas, con formas de arcos asimétricos, con la curvatura más cerrada en el extremo Suroeste. Desde Santa Teresa hasta Chuy, vuelve a presentarse una línea de playas casi rectas, de rumbo N40-45ºE a S40-45ºW.

b) Pendientes

Otro aspecto morfológico que caracteriza las playas es la pendiente de su perfil transversal. Habitualmente estos perfiles no son simples, sino que muestran la existencia de bermas, canales pre o postlitorales, medias lunas, etc. Estas formas cambian constantemente en respuesta a las variaciones de energía del oleaje, parámetro del que dependen directamente.

En el relevamiento efectuado por el MTOP para el informe “Conservación y mejora de playas” figuran los siguientes resultados:

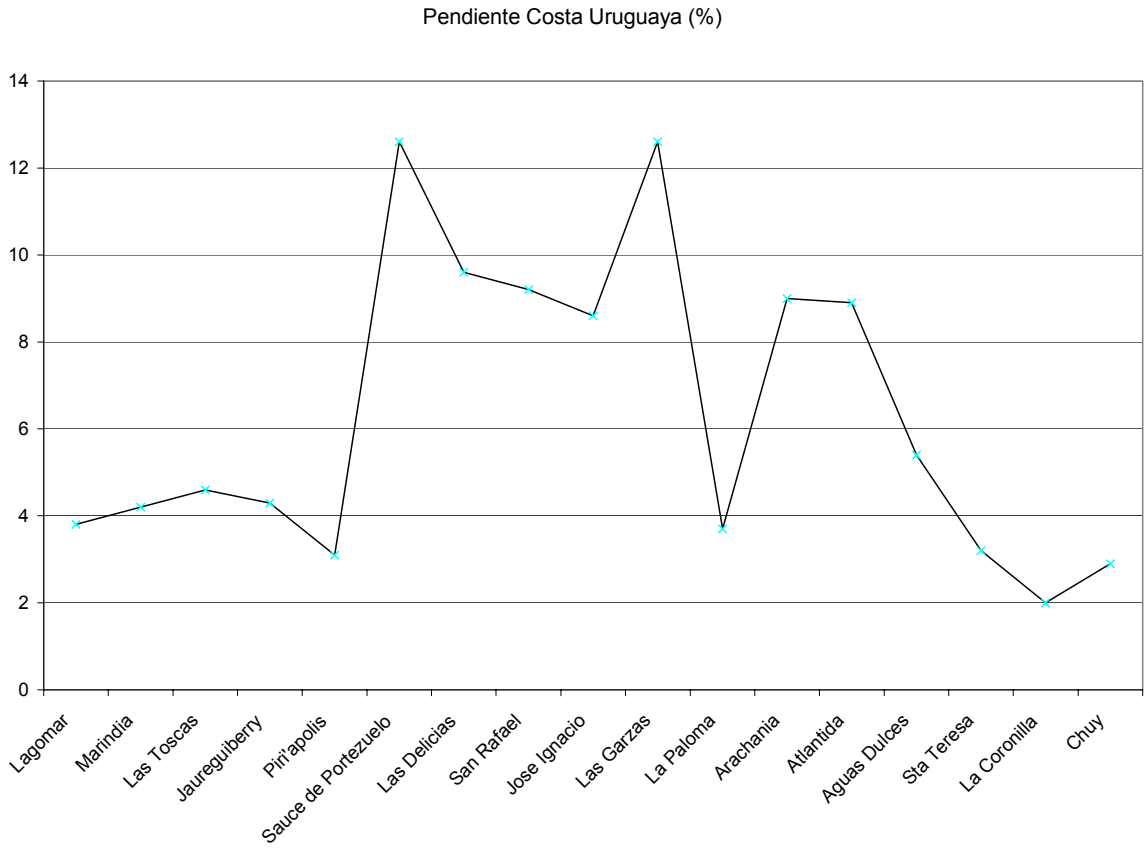


Figura 2.13 - Pendiente de las playas en la costa Este uruguaya (Adaptado de MTOP (1979) Conservación y mejora de playas)

Como puede verse, las playas de la costa uruguaya pueden dividirse en tres grupos en lo que a la pendiente respecta:

- De Carrasco a Piriápolis: playas de pequeña pendiente (3 a 5%)

-De Sauce de Portezuelo hasta Atlántica: pendientes grandes (de 8.6 a 12.6%)

-De Aguas Dulces a Chuy: Pendientes suaves de 2 a 5.4%.

En este agrupamiento la Playa de La Paloma es una excepción, ya que si bien está en una región de pendiente grande, la suya es de apenas 3.7%.

c) Granulometría

En el relevamiento citado anteriormente se han obtenido también el tamaño de grano medio (Md), el índice de selección de TRASK (S0) y el percentil 90 (P90). Estos valores se muestran en la tabla siguiente.

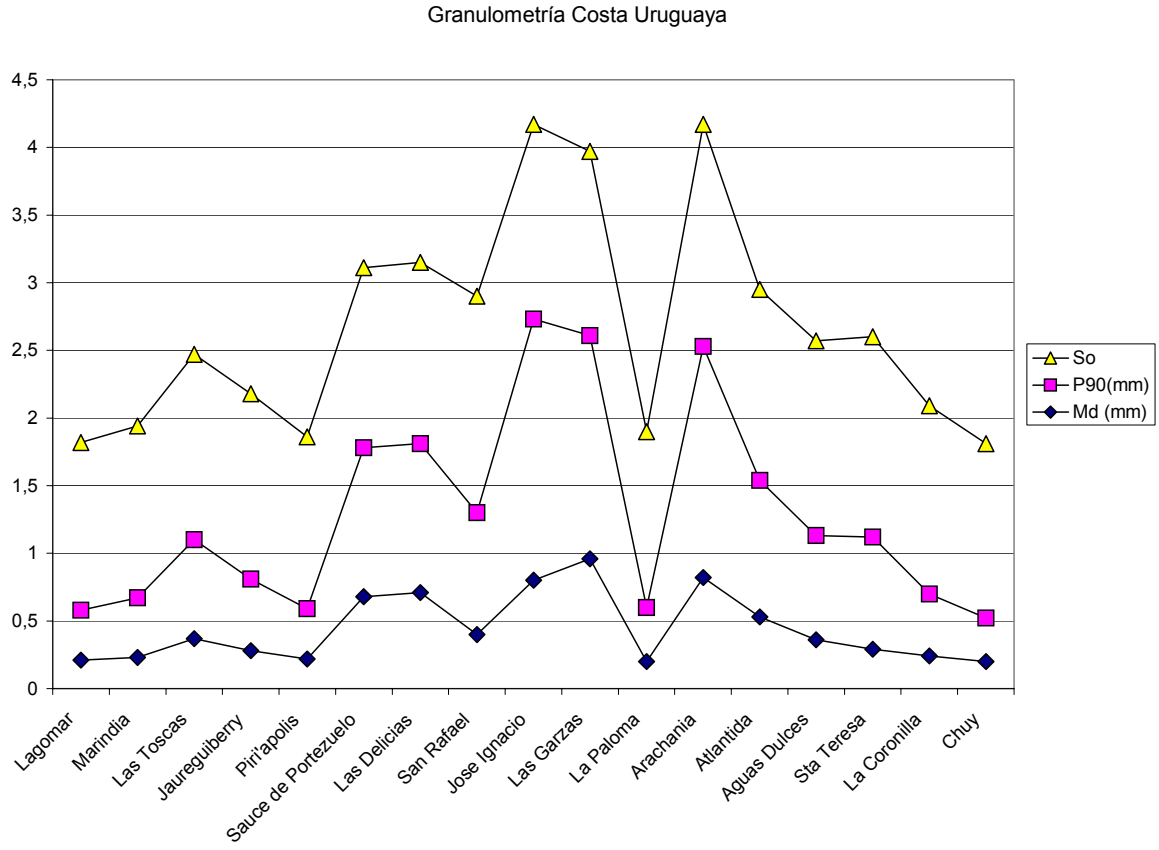


Figura 2.14 - Granulometría de arena de las playas en la costa Este uruguaya

Es así que puede verse cómo nuevamente La Paloma vuelve a ser una excepción, ya que si bien el tamaño de grano aumenta hacia el Este, esta presenta una granulometría muy fina en comparación a las playas aledañas. Lo mismo sucede con el P90 y con el S0.

En dicho informe no se indican los puntos de muestreo, por lo que tanto la granulometría como el diámetro medio deben ser considerados sólo de forma primaria. En particular los valores adjudicados a la playa de La Paloma no indican si son los correspondientes al arco La Paloma–La Pedrera o por el contrario de las playas al sur del Cabo Santa María.

d) Composición de las arenas

Haciendo un estudio de composición mineralógica de las arenas de toda la costa puede apreciarse cómo la composición de minerales densos es similar para todas las muestras, variando solo las proporciones de uno u otro mineral dentro de márgenes estrechos. El origen de estos minerales corresponde a rocas cristalinas profundas ácidas; pero como se encuentran solamente minerales de gran resistencia a la alteración, y a su vez presentan una forma redondeada, se deduce que han pasado por una serie de etapas de sedimentación y erosión antes de formar parte de las playas actuales.

La presencia de cantidades importantes de minerales densos y oscuros se corresponde localmente con la presencia de la formación Chuy; a su vez la baja presencia de carbonato de calcio (asimilable a contenidos fosilíferos) hace difícil pensar que el origen de las arenas costeras pueda ser marina. Por el contrario, todo esto indicaría que la fuente principal ha sido el aporte continental hacia las playas.

La homogeneidad en la composición de todas estas arenas refuerza la teoría de que desde el principio del Cuaternario (Raigón) se están retrabajando las mismas arenas, transportadas en forma fluvial y eólica hacia el mar y extraídas de éste por acción de las olas y también del viento.

2.6. Arco La Paloma-La Pedrera

Las secciones anteriores hacen una descripción general de los aspectos geológicos y morfológicos de toda la costa uruguaya. En esta sección se utilizan como insumos estas descripciones generales haciendo foco en la zona de La Paloma. A partir de éstos, de la observación de fotos aéreas y de constataciones propias realizadas en visitas al sitio, se hace una descripción del arco de playa y se discute someramente la posibilidad de existencia de aporte de sedimentos desde el continente hacia la zona de playa.

2.6.1. Descripción de la playa

El arco de playa La Paloma-La Pedrera se presenta como una playa tendida, de pendiente baja en su extremo sur y de arena húmeda en todo su ancho en los primeros cientos de metros desde el puerto. Esto último podría ser un indicativo de un retroceso de la línea de playa, hecho que se constata al efectuar una recorrida por la zona. A medida que se avanza hacia el norte la pendiente de la playa aumenta, así como el ancho de playa con arena seca.

Figura 2.15 - Foto de la playa entre el Espigón experimental y el puerto

2.6.2. Composición granulométrica y pendiente media de la playa

Se tomaron muestras de arena en tres secciones del arco de playa. La muestra A corresponde a un punto interior al puerto, en el muelle tres; la muestra B es tomada en la playa de La Aguada, aproximadamente 1000m al norte del muelle tres; y la muestra C fue tomada en la Playa del Barco en el balneario La Pedrera, aproximadamente 100m al sur de la punta rocosa que sirve de límite al arco de playa en estudio. Las tres muestras fueron extraídas en el punto de rompiente, siendo tamizadas en el Instituto de Estructuras y Transporte de facultad de Ingeniería. El resultado del análisis granulométrico se presenta en la siguiente tabla:

		Muestra A (muelle 3)			Muestra B (La Aguada)			Muestra C (La Aguada)		
US Tamiz Nº	Tamiz(mm)	Peso total(g)	284,2		Peso total(g)	381,1		Peso total(g)	531,3	
		Peso(g)	Peso(%)	% Pasa	Peso(g)	Peso(%)	% Pasa	Peso(g)	Peso(%)	% Pasa
1/4	6,35	0,1	0,0%	100%	0,2	0,1%	100%	0,7	0,1%	100%
4	4,75	0,1	0,0%	100%	0	0,0%	100%	0,2	0,0%	100%
8	2,36	0,2	0,1%	100%	0,4	0,1%	100%	11,8	2,2%	98%
10	2	0,1	0,0%	100%	0,2	0,1%	100%	11,1	2,1%	96%
20	0,85	1	0,4%	99%	1,8	0,5%	99%	319,2	60,1%	35%
40	0,425	2,7	1,0%	99%	4	1,0%	98%	175,4	33,0%	2%
50	0,3	2,8	1,0%	98%	5	1,3%	97%	7,3	1,4%	1%
80	0,18	12,2	4,3%	93%	145	38,0%	59%	3,3	0,6%	0%
100	0,15	156,4	55,0%	38%	165,5	43,4%	15%	1,3	0,2%	0%
200	0,075	108,6	38,2%	55%	59	15,5%	43%	1	0,2%	0%
Observaciones		Obs: Hasta tamíz Nº4 sólo conchillas			Obs: Hasta tamíz Nº4 sólo conchillas			Obs: Hasta tamíz Nº4 sólo conchillas		

Tabla 2.8 - Porcentajes que pasa para las distintas muestras

Estos resultados se muestran en el siguiente gráfico:

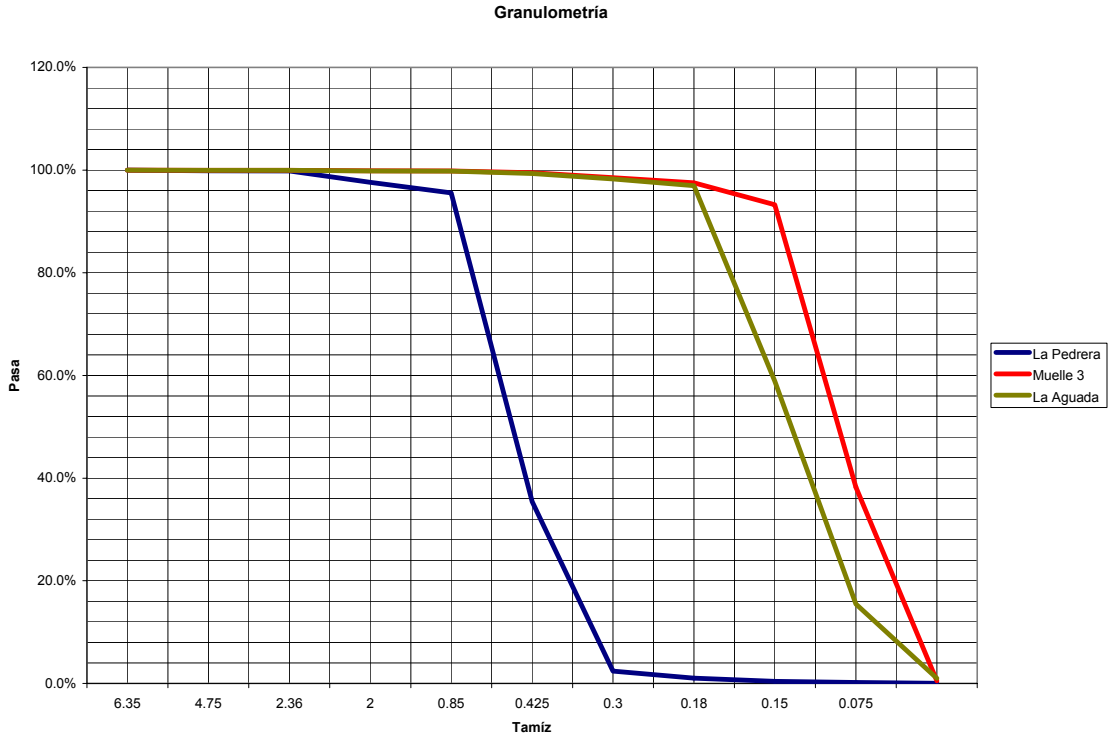


Figura 2.16 Curvas granulométricas % que pasa contra abertura de tamiz en mm

Los parámetros granulométricos que se obtuvieron son los siguientes:

	Muestra A (Muelle 3)	Muestra B (La aguada)	Muestra C (La Pedrera)
D10	0.02	0.05	0.39
D30	0.06	0.10	0.40
D60	0.10	0.15	0.60
D50	0.09	0.13	0.53
Cu	5.54	3.24	1.54
Cz(curvatura)	1.74	1.42	0.68

Tabla 2.9 -Parámetros granulométricos de las muestras. Diámetros en mm

Puede concluirse que, como era de esperar, la granulometría en el puerto es considerablemente menor que en la playa de la aguada. Este resultado se justifica por la baja energía de las olas incidentes, que son afectadas por la presencia de la escollera del puerto.

Por otro lado en la playa La Pedrera la arena es considerablemente más gruesa con una menor proporción de finos; esto se debe a que la mayor energía del oleaje hace que los mismos se mantengan en suspensión. En particular la playa de La Pedrera está orientada con un ángulo de 140° que hace que las olas provenientes del cinturón depresionario subpolar (160.5°) incidan con mayor energía que en La Aguada, en donde la orientación hace que las mismas lleguen de forma oblicua.

Se ha medido también la pendiente en la playa de La Aguada y en la playa contigua al puerto a un lado del espigón. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Espigón	
Distancia (m)	Cota (cm)
0	191.5
5	175
15	138
25	99
35	67
45	37
55	24
65	0

Playa La Aguada	
Distancia (m)	Cota (cm)
0	193.5
10	162
20	117
30	69
40	54
50	43
60	0

Tabla 2.10 -

Pendiente de la playa

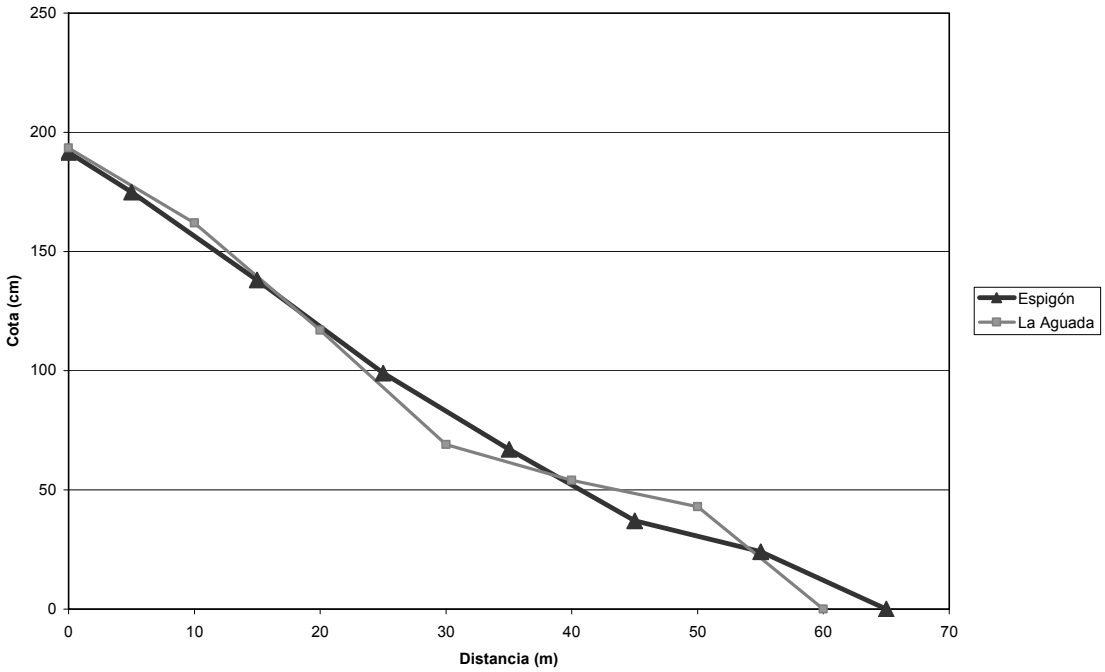


Figura 2.17 - Pendiente de la playa contigua al puerto y de La Aguada

La pendiente en ambos tramos de las playas resultan muy similares. La pendiente media de las mismas es de 3.0% para el espigón y 3.2% para la playa de La Aguada.

Los resultados obtenidos, tanto en granulometría como en la pendiente media de la playa, concuerdan con los resultados presentados en el MTOP en el informe citado en la sección anterior. De cualquier forma cabe recalcar que tanto el relevamiento efectuado por el MTOP como el realizado para este trabajo se realizó en un único día, por lo que está sujeto a las condiciones en las que se encontraba el mar en ese instante dado. El día de medición el viento soplaba suave desde el SE, las olas tenían un período de aproximadamente 10 segundos y el nivel del mar estaba muy cerca de la media a 0.87 metros del 0 Wh.

2.6.3. Sobre el Espigón experimental

A unos 350m al norte del puerto se encuentra un espigón experimental construido en hormigón, de aproximadamente 35m de largo medidos desde la línea de playa. A simple vista puede corroborarse que a un lado y a otro el nivel de arena permanece a la misma altura. Por otro lado en fotos aéreas, así como en la observación directa, no se observa un cambio de la forma en planta de la playa, lo que también indicaría que este espigón no está siendo efectivo en la retención de arena. La integridad estructural no parece haber sido afectada, por lo que se abren dos posibles hipótesis sobre las que se volverá más adelante: el transporte litoral en esta zona es escaso, por lo que la arena que produce el aterramiento en el puerto sería debida a otro tipo de aporte, o bien que el espigón está siendo totalmente sobrepasado por la cantidad de arena que intenta retener. Sobre la primera hipótesis se discute en el capítulo 3 mientras que la segunda es retomada en la sección 4.7.

Figura 2.18 - Foto del espigón experimental

2.6.4. Posibles aportes desde el continente

Como se ha señalado anteriormente en las cercanías de este arco de playa existen varios elementos geomorfológicos capaces de aportar importantes cantidades de arena a la playa. En particular se constatan la existencia de cárcavas en la zona noreste de La Paloma, así como de depósitos litorales y cordones de médanos todo a lo largo del arco de playa. Más allá de esto interesa principalmente evaluar, aunque sea primariamente y en forma cualitativa, la capacidad de los distintos agentes de transporte de erosionar estos elementos para hacer aportes de arena a la playa.

Tanto en fotos aéreas como por observación directa se constata un alto grado de urbanización en toda la zona, en particular en las cercanías del puerto. Además de haber construido una avenida (Avenida Costanera) próxima a la última línea de dunas, se observan varias construcciones por delante de la línea de médanos. También se constata una amplia área forestada, que abarca varios kilómetros desde la costa hacia el continente. Todas estas acciones antrópicas hacen pensar que posibles aportes que pudieran darse desde el continente están siendo interrumpidos o por lo menos menguados. En particular los aportes eólicos parecen ser los más afectados por el alto grado de cobertura vegetal que presentan los médanos y zonas adyacentes a las playas. A su vez no se constatan cursos permanentes de agua capaces de transportar caudales sólidos importantes, limitándose los aportes del continente a los producidos por corrientes transitorias que ante lluvias intensas llegan a descargar en el arco de playa.

O sea que, si bien existe una amplia zona de formaciones sedimentarias con contenido de arena capaces de contribuir de forma importante con caudales sólidos de aporte a la playa, estos aportes están siendo afectados negativamente por la acción del hombre.

Capítulo 3 – Diagnóstico

3.1. Introducción

En el capítulo 2 se presentan las características generales de la zona en la que está emplazado el puerto así como los datos de oleaje y mareas de los que se dispone para llevar adelante este proyecto y que, a su vez, caracterizan en forma general el comportamiento de las aguas en la zona del puerto.

Este capítulo pretende entonces utilizar los elementos disponibles para hacer un diagnostico satisfactorio de la problemática del puerto de La Paloma.

Como bien se sabe el problema que se busca solucionar es el ingreso de arena al puerto. Claramente, antes de buscar una solución al problema se debe tener una comprensión lo más acabada del mismo y un diagnóstico, tan preciso como sea posible, de cuales son las causas del problema y de todos los elementos relevantes que están relacionados con dichas causas y que puedan ser determinantes a la hora de buscar una solución. Muchas veces para realizar el diagnóstico de las causas de un problema no se dispone de mayores indicios y se debe comenzar por realizar un análisis minucioso de todos los fenómenos involucrados. Sin embargo esto no se aplica para este proyecto. Aquí se dispone de una hipótesis de partida y el objetivo central del diagnóstico consiste en verificar dicha hipótesis. Adicionalmente, las secciones finales del capítulo están dedicadas al análisis de otros elementos que son relevantes a la hora de tomar una decisión en cuanto al diseño final de una solución.

La hipótesis de la que se parte, y que se verifica en las secciones 3.3, 3.4 y 3.5, es que el ingreso de arena al puerto de La Paloma está generado mayoritariamente por el transporte litoral de arena en dirección sur. Esta arena, una vez dentro del puerto, ya no se encuentra disponible para el transporte litoral en dirección norte y por lo tanto constituye un aporte para el aterramiento del muelle 3.

También resulta importante conocer con mayor detalle el comportamiento de la bahía que va desde el puerto hasta La Pedrera. Se entiende que la zona de La Aguada y Costa Azul de dicha bahía se encuentra en retroceso, por lo que en la sección 3.6 se hace un análisis del equilibrio de la bahía y del retroceso de la misma. Se pretende que este análisis sirva de insumo para introducir consideraciones ambientales desde la etapa más temprana del diseño de la solución.

3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este capítulo son:

- Verificar la hipótesis preliminar de que el ingreso de arena al puerto se da mayoritariamente por transporte litoral. Para esto se calcula el transporte litoral potencial en dirección al puerto a partir de datos de oleaje (secciones 3.3 y 3.4) y se contrasta el resultado obtenido con el volumen medio anual de arena que ingresa al puerto obtenido a partir de datos de campo (sección 3.5).

- Definir si la bahía se encuentra en equilibrio estático o dinámico, o si, por el contrario existe un retroceso; en este último caso intentar cuantificar el retroceso. Adicionalmente estimar la influencia de los dragados en el equilibrio de la bahía (sección 3.6).

3.3. Propagación del oleaje desde aguas profundas

3.3.1. Introducción

Para poder estimar el transporte de sedimentos generado por las corrientes litorales es necesario conocer las características de las olas en la zona de rompiente. En particular se deben conocer la altura y la dirección de la ola cuando ésta rompe.

En esta sección se detalla el procedimiento seguido para obtener los datos requeridos a partir de los datos de oleaje disponibles. En la **sección 3.3.2** se estipulan los objetivos específicos que se persiguen en este capítulo. En la **sección 3.3.3** se hace una breve introducción a la propagación del oleaje y a los problemas que ésta presenta. Luego, en la **sección 3.3.4,** se describen los diversos elementos (información de base, herramientas, etc.) de los que se dispone para llevar a cabo la propagación. En la **sección 3.3.5** se define el procedimiento genérico utilizado en la propagación. La **sección 3.3.6** está dedicada a la discusión de los resultados obtenidos, su validez y su aplicabilidad para los objetivos de este trabajo. Finalmente en la **sección 3.3.7** se presentan las conclusiones generales de la sección 3.3.

3.3.2. Objetivo

El objetivo central es obtener, en el arco de playa que va desde el puerto de La Paloma hasta aproximadamente 4000m al norte (casi 5000m de costa), los siguientes elementos:

- Altura de rotura de ola (H_b) para cada una de las olas que tienen posibilidad de generar transporte de sedimentos en dirección sur (hacia el puerto).
- Angulo que forma el tren de olas respecto a la costa en la zona de rompiente (α_b) para el mismo conjunto de olas.

A fin de disminuir la complejidad del análisis se seleccionan 5 zonas del arco de playa para las cuales se calculan los elementos recién presentados. Cada zona es considerada como un único punto para el cual se calculan $\mathbf{H_b}$ y $\boldsymbol{\alpha_b}$ como un promedio de los resultados obtenidos en toda la zona.

Las cinco zonas, denominadas como **A**, **B**, **C**, **D** y **E** se muestran en la figura siguiente:

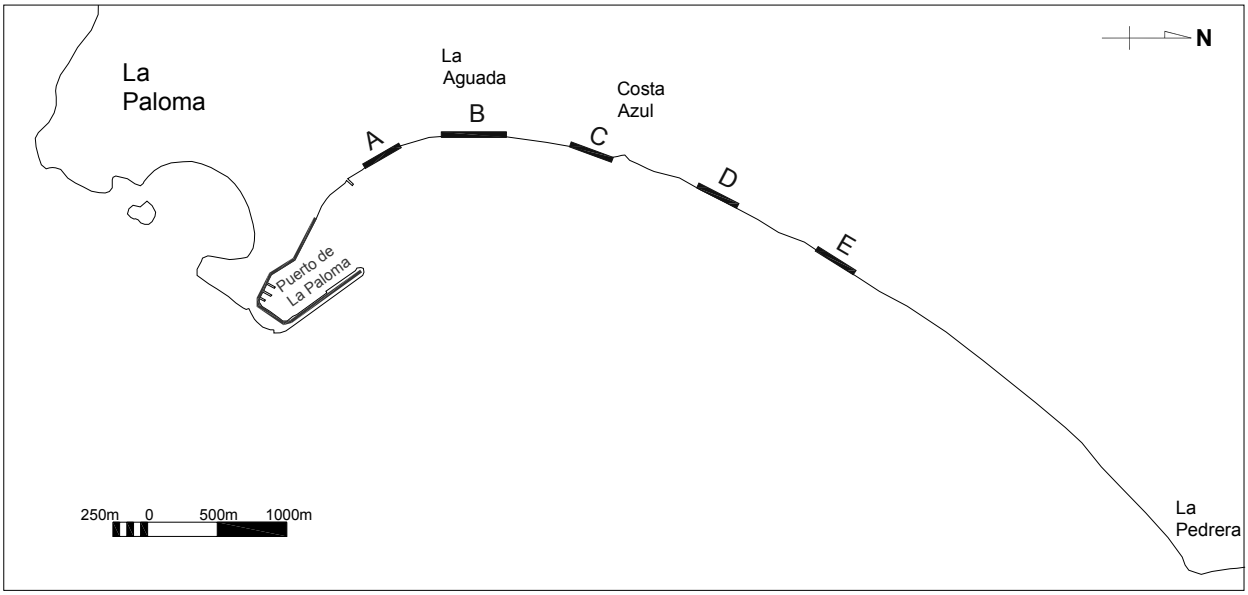


Figura 3.1 -

Finalmente el objetivo específico de este capítulo puede resumirse como:

Obtener, para cada una de las olas cuya dirección incidente esté comprendida entre los 15º y los 135º, cinco parejas de valores (H_b,α_b), representativos de la ola rompiente en cada una de las cinco zonas definidas con anterioridad (A, B, C, D y E).

3.3.3. Conceptos generales

Esta sección pretende dar una idea general y muchas veces cualitativa de lo que es la propagación del oleaje y de cómo se maneja en este proyecto. Aquí no se pretende hacer un desarrollo de la teoría del oleaje, pero se deja constancia de las fuentes que han sido utilizadas en el proyecto en las que sí se puede encontrar un mayor desarrollo teórico.

La ola por ser una onda no estacionaria viaja (o se propaga) con una determinada dirección. Una ola que se encuentra en aguas profundas, lejos de la costa, podrá por lo tanto propagarse hacia la costa si es que tiene la dirección adecuada. El Coastal Engineering Manual (**CEM**) distingue tres escenarios distintos bajo los cuales se puede dar la propagación de la ola hasta la costa:

1º) Olas generadas por viento en aguas profundas que se propagan a aguas menos profundas mientras siguen recibiendo energía del viento.

2º) Olas generadas por una tormenta en aguas profundas que se propagan a aguas menos profundas sin acción del viento (mar de fondo)

3º) Olas generadas en aguas poco profundas por la acción de tormentas locales. Estas olas crecen hasta interactuar con el fondo o hasta que la pendiente de las mismas se torne crítica produciéndose la rotura de la misma. Esto siempre y cuando la ola esté limitada ni por la distancia en la cual actúa el viento (“fetch”) ni por la duración de la tormenta. En este caso no hay propagación desde aguas profundas.

No es habitual que los datos de olas de que dispone un ingeniero proyectista distingan entre aquellas olas formadas localmente y aquellas formadas en otras regiones, o que distingan, para olas formadas en otras regiones, aquellas que se han propagado bajo la acción del viento de aquellas que se han propagado libremente. Esto hace que sea sumamente difícil propagar el oleaje hasta la costa bajo los escenarios 1º) y 3º). Por otro lado el CEM (pág. II-3-6) encuentra satisfactorio para fines ingenieriles realizar la propagación del oleaje que ha sido registrado lejos de la costa hasta la misma bajo las hipótesis del escenario 2º); esto es suponiendo que todo el oleaje registrado es de tipo mar de fondo y que la propagación desde el punto de registro hasta la costa se da sin ningún tipo de influencia de vientos y/o corrientes.

Por lo anteriormente dicho es que de ahora en más esta sección se centra en la descripción de los fenómenos físicos involucrados en la propagación despreciando cualquier posible efecto que pudieran ocasionar los vientos y/o las corrientes.

3.3.3.1. Fenómenos físicos involucrados en la propagación

a) Refracción y asomeramiento

Cuando la ola interactúa con el fondo el número de onda, la celeridad y la celeridad de grupo se ven afectados. Estos cambios se traducen en cambios de dirección (conocidos como refracción) y de altura de ola (conocidos como asomeramiento).El que la ola interactúe o no con el fondo está determinado por la longitud de onda de la misma (o del número de onda, como se prefiera) la cual, a partir de la ecuación de dispersión, depende tan solo del período y de la profundidad.

b) Difracción

En aquellos casos en que el gradiente de energía en la dirección transversal a la de propagación es muy elevado se da una significativa transferencia de energía en aquella dirección. A la propagación de energía en la dirección transversal a la de propagación del oleaje se le llama difracción. La difracción se da habitualmente en la zona de sombra que existe detrás de las escolleras o cuando por refracción y/o asomeramiento se generan puntos de gran acumulación de energía (y por lo tanto gran altura de ola).

c) Rotura de la ola

La rotura de la ola se produce cuando la ola alcanza una relación crítica entre su altura y la profundidad existente. Es común que esta relación crítica se tome igual a 0.78.

Una vez que se produce la rotura de la ola se entra en la zona de rotura, en la cual se deben tener cuidados especiales a la hora de propagar.

d) Fricción con el fondo

La ola puede interactuar con el fondo de diversas formas, sin embargo cualquiera sea la forma de interacción ésta siempre producirá una pérdida de energía. Las tres formas de interacción más comunes son:

- Generación de una capa límite turbulenta.
- Generación de una capa límite laminar.
- En aquellos casos en que exista un fondo poroso puede darse que los sucesivos aumentos y descensos de presión que genera la ola al pasar produzcan un flujo oscilatorio (entrante y saliente) a través del fondo poroso, con la consiguiente pérdida de energía.

Generalmente en una determinada zona sólo uno de los mecanismos de pérdida de energía por fricción mencionados es predominante y por lo tanto los demás pueden ser despreciados.

3.3.3.2. Importancia de la profundidad en la propagación

Como se ha visto, los cambios que sufre la ola al propagarse están determinados principalmente por su interacción con el fondo. Por esto es que resulta interesante detenerse y hacer un pequeño paréntesis para analizar este tema con un poco más de profundidad. Esto, además de resultar ilustrativo, es utilizado en la sección 3.3.4.4

Se comenzará analizando la variación del número de onda (**k=2π/L**) con la profundidad. La variación del número de onda es de suma importancia ya que esta variación es la que está por detrás de fenómenos como la refracción y el asomeramiento. La ecuación de dispersión, que relaciona la profundidad, el período y la longitud de onda es de la forma:

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{2\pi g}{L} tgh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)$$

en donde ***T*** es el período, ***L*** la longitud de onda y ***d*** la profundidad.

Bajo la hipótesis de que el período de la ola no cambia durante la propagación se resuelve la ecuación de dispersión para varios períodos, resultando el siguiente gráfico:

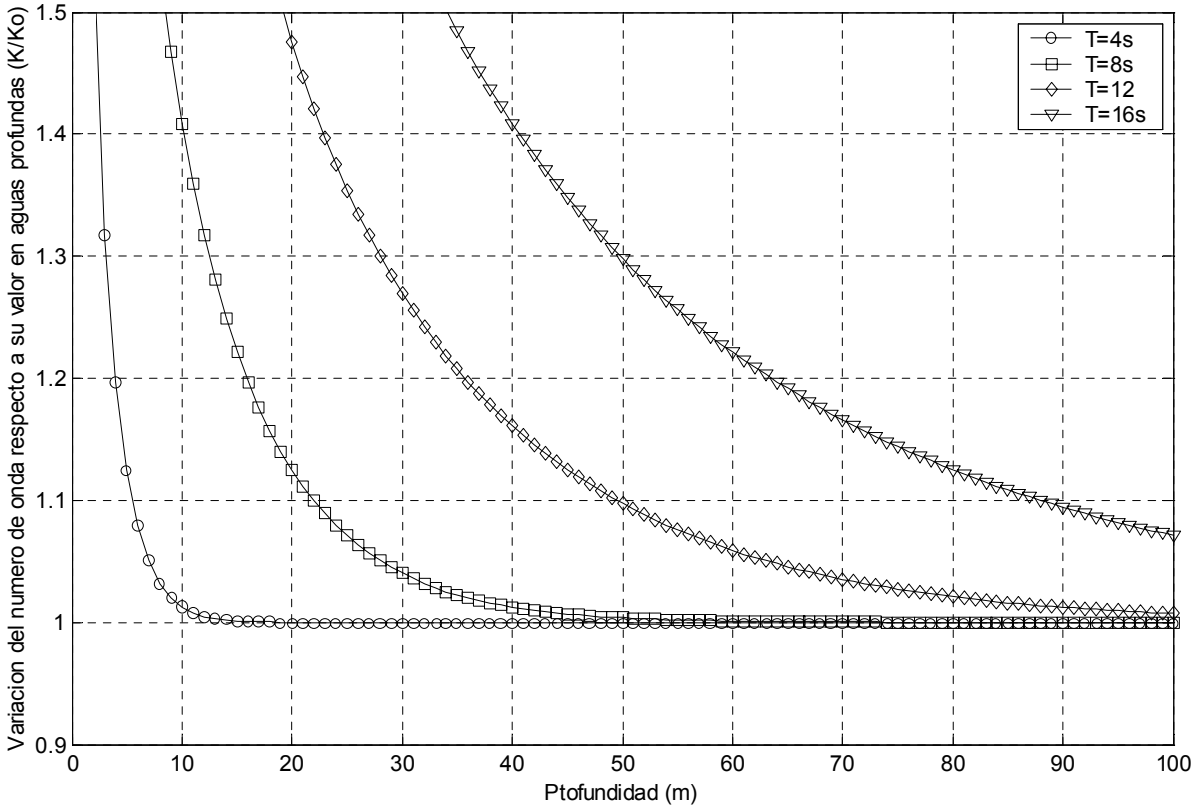


Figura 3.2 -

Es interesante ver cómo la variación del número de onda con la profundidad se da gradualmente al comienzo (cuando la ola recién sale de aguas profundas).

La profundidad para la cual el número de onda comienza a variar (profundidad límite) se aproxima a ½ de la longitud de onda en aguas profundas, la cual esta dada por:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad \Rightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} prof_{LIM} = \dfrac{gT^2}{4\pi} \\ k_0 = \dfrac{4\pi^2}{gT^2} \quad [1] \end{array} \right\} \Rightarrow \quad k_0\, prof_{LIM} = \pi \quad [2]$$

Si se reordena [1] y se introduce en la ecuación de dispersión se obtiene:

$$gk_0 = \frac{2\pi g}{L} tgh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad \Rightarrow \quad \frac{k_0}{k} = tgh(kd) \quad \Rightarrow \quad kd = atgh\left(\frac{k_0}{k}\right)$$

Al dividir sobre [2] en ambos lados de la igualdad se obtiene:

$$\frac{d}{prof_{LIM}} = \frac{k_0}{k} \frac{atgh\left(\dfrac{k_0}{k}\right)}{\pi}$$

De esta ecuación surge que el cambio relativo de la profundidad requerido para obtener un determinado cambio relativo del número de onda es totalmente independiente de las características de la ola (altura, período). A modo de ejemplo, y dado que el resultado es usado más adelante, se calcula el porcentaje de variación de la profundidad requerido para que el número de onda aumente un 1.5%

$$\frac{k_0}{k} = \frac{1}{1.015} \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{prof_{LIM}} = \frac{1}{1.015} \frac{atgh\left(\dfrac{1}{1.015}\right)}{\pi} \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{prof_{LIM}} = 0.7684$$

Esto cuantifica lo dicho con anterioridad. Para que el número de onda varíe un 1.5% respecto a su valor en aguas profundas la profundidad deberá disminuir aproximadamente un 23%, lo cual si se considera pendiente constante hasta la costa implica casi ¼ del recorrido desde aguas profundas hasta la costa.

Esto resulta de sumo interés por dos razones: por un lado la refracción depende del gradiente del número de onda por lo cual en aquellos tramos en que éste sea bajo el cambio de dirección también será bajo. Por otro lado el asomeramiento depende de la raíz de la relación existente entre el número de onda y su valor en aguas profundas, con lo cual nuevamente se tiene que si la variación del número de onda es pequeña entonces el asomeramiento también será pequeño.

3.3.3.3. Modelos numéricos de propagación

Hoy en día la propagación del oleaje hasta la costa se lleva a cabo mediante la utilización de modelos numéricos. Estos modelos resuelven de forma discreta las expresiones matemáticas de alguno o todos los fenómenos físicos involucrados en la propagación. Tres elementos centrales a la hora de seleccionar un modelo son:

- *Que el modelo se ajuste a los fenómenos que se quiere modelar*. Es práctica habitual simplificar un fenómeno físico complejo de modo de quedarse con los elementos centrales del mismo y que son aquellos que definen el comportamiento del sistema. Un modelo numérico deberá por lo tanto resolver adecuadamente esta situación simplificada sin omitir ninguna de las ecuaciones que controlan el fenómeno. Uno tendería a pensar que el hecho de que el modelo numérico sea más complejo (que modele situaciones que involucran un mayor número de fenómenos físicos) podría ser una ventaja. Sin embargo esto no necesariamente es así; es más, ello podría hasta llegar a ser una desventaja. Un modelo que involucre un mayor número de fenómenos requerirá casi con seguridad una mayor capacidad de cálculo, un mayor ingreso de información y, lo que puede ser aún más complejo de solucionar, una mayor experiencia en el manejo del mismo para interpretar si los resultados son correctos o no.

- *Que el modelo sea factible de correr en tiempo y forma con la capacidad de cálculo disponible*. Puede suceder que la capacidad de cálculo disponible no sea suficiente para correr alguno de los modelos numéricos que se ajustan a la situación simplificada que se desea resolver.

- *Que el modelo se pueda correr con la información disponible*. En caso contrario habrá que hacer suposiciones sobre la información faltante (lo cual introduce un grado de incertidumbre importante) o buscar más información (lo cual puede no ser posible).

3.3.3.4. Elementos requeridos para llevar a cabo la propagación

- **Datos de olas.** Este es básicamente el elemento central. La información de oleaje, registrada en algún punto cercano a aquel para el cual se quiere conocer el oleaje, es la información de base sin la cual no se puede hacer prácticamente nada. De no estar disponible esta información deberá estimarse mediante otros parámetros, como ser el viento. Esto, que parece trivial, muchas veces es un escollo importante que salvar para el proyectista ya que la información de oleaje es escasa y relativamente reciente, con la desventaja adicional que plantea el elevado costo que implica llevar a cabo una campaña de medición. Dada esta situación no suele existir la posibilidad de elegir las características de los datos con los que trabajar por lo cual el cómo llevar adelante la propagación (y el proyecto) deberá adaptarse a la información disponible.

- **Datos batimétricos.** Como ya se ha dicho, la transformación que sufre la ola al propagarse está determinada por su interacción con el fondo. Es por esto que cuanto más precisa sea la información que se disponga respecto a las características del fondo mayor certidumbre se tendrá respecto a las características de la ola en la costa. Como se ha visto, las características de la ola presentan su mayor tasa de cambio cuando ésta ya está relativamente cerca de la costa (a profundidades de aproximadamente 20m en adelante) por lo cual lo más importante será conocer cómo es la batimetría en dicha zona.

- **Modelos numéricos.** Se deben hacer las hipótesis simplificatorias necesarias que permitan modelar el fenómeno físico con la información de base de la que se dispone. Una vez definida la situación simplificada se debe proceder a la selección o realización de un modelo que se ajuste a la misma y que, por supuesto, pueda correrse con la información y la capacidad de cálculo de que se dispone.

3.3.4. Elementos disponibles para llevar a cabo la propagación

3.3.4.1. Datos de olas

En el capítulo anterior se presentan los datos de olas de los que se dispone y se muestran los mismos en dos tablas: una tabla con frecuencia anuales de ocurrencia de olas agrupadas según su altura y su dirección (tabla 2.1) y otra con las olas agrupadas según su altura y su período (tabla 2.2).

Si bien ambas tablas surgen del mismo conjunto de observaciones éstas están disociadas. Esto quiere decir que dada una altura de ola y una dirección no se sabe a priori cual es el período que le corresponde a dicha ola, o lo que es lo mismo, dada una altura de ola y un período no se sabe a priori cual es la dirección de propagación de dicha ola. Esto introduce un grado de incertidumbre ya que en la propagación es necesario tener la ola totalmente definida: en primer lugar, para propagar el oleaje, la dirección original resulta central por razones obvias; por otro lado el período es determinante en la propagación ya que de él depende la longitud de onda y por ende el grado de interacción con el fondo; finalmente la altura de la ola tendrá gran influencia tanto en la altura final de rotura como en todo lo relacionado con las pérdidas de energía por fricción con el fondo.

Para sortear este problema se optó por asociar a cada altura significativa un período representativo. De esta forma cada ola definida en la **tabla 2.1** por su altura y su dirección queda totalmente determinada al asociarle a dicha altura su período representativo.

3.3.4.2. Cálculo de un período representativo para cada altura de ola

En principio se plantean dos posibles métodos para asignar a cada altura significativa un período representativo:

> *Método a)* Para cada conjunto de alturas significativas, en la **tabla 2.2**, hallar un período medio ponderando según la frecuencia de ocurrencia de cada período.
>
> Método b) Para cada conjunto de períodos, en la **tabla 2.2**, hallar una altura media ponderando según la frecuencia de ocurrencia de cada altura significativa.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada caso:

Método a)			
Altura de ola significativa (m)			Período promedio calculado para cada altura de ola (s)
0	a	0.5	5.4
0.6	a	1.0	5.7
1.1	a	1.5	6.3
1.6	a	2.0	6.8
2.1	a	2.5	7.0
2.6	a	3.0	8.0
3.1	a	4.0	8.0
4.1	a	5.0	8.2
5.1	a	6.0	9.7
6.1	a	7.0	7.2
7.1	a	8.0	
8.1	a	9.0	
9.1	a	10.0	10.5
10.1	a	12.0	8.5
12.1	a	14.0	
14.1	a	16.0	8.5
16.1	a	18.0	
18.1	a	20.0	
20.1	o mayor		

Método b)			
Período (s)			Altura promedio calculada para cada período (m)
0	a	5	0.9
6	a	7	1.6
8	a	9	2.0
10	a	11	2.0
12	a	13	2.1
14	a	15	2.5
16	a	17	1.3
18	a	19	1.1
20	a	21	
22	o mayor		

Tabla 3.1 – Cálculo de un período representativo para cada altura significativa

En la siguiente figura se representan gráficamente los resultados obtenidos con ambos métodos. Se puede observar que el método de cálculo **b** (denominado como *"Altura promedio calculada para cada período"* en la gráfica) presenta períodos mayores que los resultantes del método **a** (denominado como *"Período medio calculado para cada altura significativa"* en la gráfica), el cual sin embargo da resultados para una gama mucho mayor de alturas significativas.

Los últimos tres datos calculados con el método **a** (datos que no están en la gráfica) son eliminados del análisis por corresponder a olas registradas tan solo una vez durante los 47 años de observaciones.

A la hora de decidir con qué períodos trabajar se han tomado dos hipótesis básicas:

- Por un lado es de esperar que aquellas olas que provengan del océano Atlántico tengan un período mayor a 10s. Esto se debe a que se produce una pequeña transferencia de energía entre olas de pequeño período a olas de mayor período, resultando que las olas de pequeño período pierdan energía y viajen menos y las de gran período ganen energía y por tanto viajen más.

- Por otro lado es lógico pensar que las máximas alturas significativas correspondan a olas formadas por tormentas locales (olas que llegan a la costa bajo la acción continua del viento), las cuales, a su vez, tienen períodos menores que las olas de mar de fondo ya que aún no se ha traspasado la energía de las altas frecuencias a las bajas frecuencias.

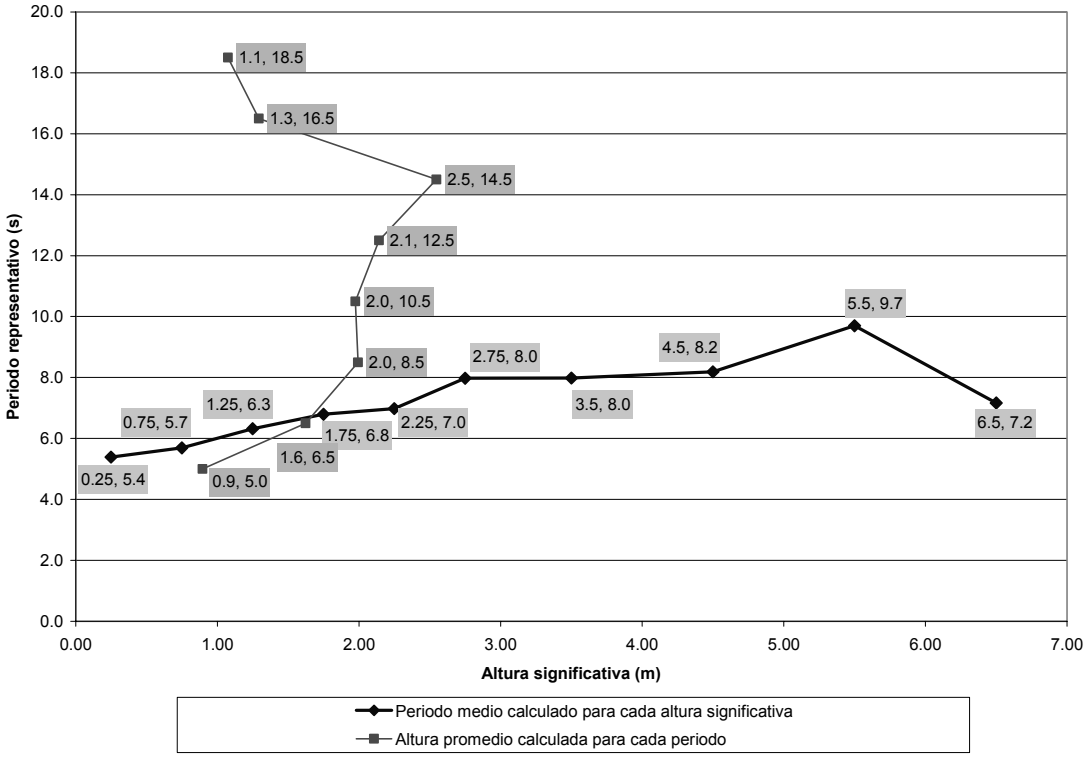


Figura 3.3 -

Apoyándose en estas hipótesis se opta por tomar, para las olas de altura significativa de 0m a 3m, los períodos calculados con el método **b** y, para aquellas olas cuya altura significativa esté comprendida entre 3m y 6m se toman los períodos calculados mediante el método **a**. En el método **a**, la altura de ola para cada período ponderado se considera igual al valor medio del intervalo. En el método **b** se toma el mismo criterio para asignarle un período a cada altura ponderada salvo en las olas de período entre 0s y 5s donde se toma un período de 5s.

Cabe aclarar que en este caso se eliminan los últimos dos datos que arroja el método **b** (períodos de 16.5s y 18.5 s para olas de 1.3m y 1.1m respectivamente) ya que estos valores surgen de unas pocas observaciones de olas de entre 0m y 1.5m que poseen períodos muy altos (17 observaciones de olas con alturas entre 0m y 1.5m y con período entre 14s y 19s), mientras que la gran mayoría de las olas de 0m a 1.5m de altura poseen períodos significativamente menores (3695 observaciones de olas con altura entre 0m y 1.5m y con período entre 5s y 9s).

Para la altura significativa 2m se debe tener consideraciones especiales ya que el método **b** arroja para ella dos períodos representativos: 8.5s y 10.5s. Con el fin de obtener un único período representativo de las olas de 2m de altura significativa se ponderan los períodos obtenidos en función de las observaciones registradas para cada uno de ellos (650 observaciones para 8.5s y 231 observaciones para 10.5s). De este modo se obtiene un período promedio de 9.0s

A partir de las parejas **(H_s(m),T(s))**, que definen una relación entre la altura significativa y el período; luego se interpola para obtener el período representativo de cada uno de los grupos de alturas significativas en que está agrupada la **tabla 2.1** (Altura – Dirección). Los resultados se presentan a continuación en la **tabla 3.2** y en la **figura 3.4**.

Hs (m)	T (s)
0.9	5
1.6	6.5
2	9.0
2.1	12.5
2.5	14.5
3.5	8.0
4.5	8.2
5.5	9.7

Método **a**
Método **b**

Hs (m)	T (s)
0.25	5.0
0.75	5.0
1.25	5.8
1.75	7.4
2.25	13.3
2.75	15.8
3.50	8.0
4.50	8.2
5.50	9.7
6.50	7.2

Tabla 3.2 – Resultados finales que definen la relación entre altura significativa y período

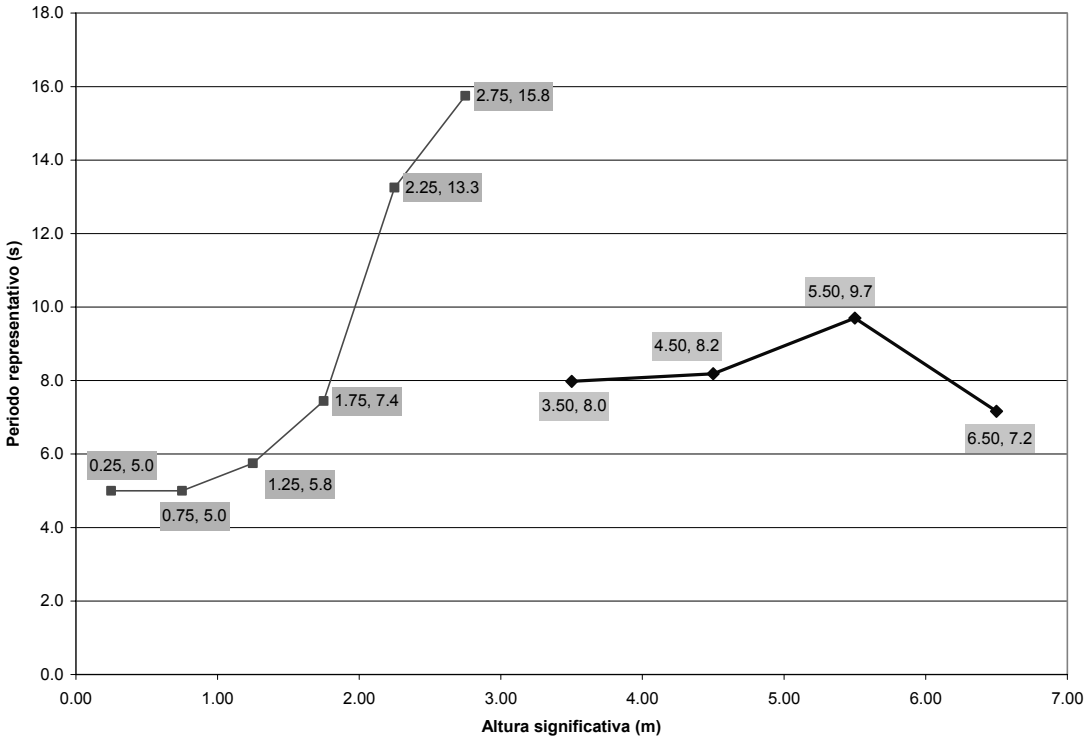


Figura 3.4 - Representación gráfica de la relación encontrada

A partir de la relación anterior se puede construir una tabla de frecuencia de oleaje en la cual cada ola está totalmente definida por una dirección, un período, una altura significativa y una frecuencia de ocurrencia anual. Dicha tabla se presenta en páginas siguientes como **Tabla 3.3**.

Ésta tabla es la que se utiliza en las próximas secciones para obtener las estadísticas de oleaje en los distintos puntos de la costa.

Debe aclararse que no parece adecuado que el período encontrado para las olas de altura 6.5m sea menor que el de las olas de 5.5m, sin embargo, dada la

baja frecuencia anual con que ocurren estas olas no ameritan que se busque una nueva metodología exclusivamente para definir un período más exacto para ellas.

Una forma de interpretar los resultados obtenidos en cuanto a la relación entre la altura significativa y el período (interpretación que es utilizada y sobre la cual se discute más profundamente en la sección 3.6.4) es considerar por un lado el oleaje con altura de ola hasta 3m como mar de fondo y al oleaje con altura de ola mayor a 3m como oleaje de viento de generación local.

Frecuencias Anuales														
Hs (m)	T (s)	Dirección												Frecuencia total
		……	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
0.25	**5.0**	1.3	2.3	3.7	4.9	2.1	1.3	1.9	2	1.3	1.5	0.9	0.8	1.1	25.0
0.75	**5.0**	0.1	1.1	2.3	4.4	2.3	1.2	1.9	2.1	1.7	1.4	0.6	0.8	0.7	20.4
1.25	**5.8**	0	0.8	2.5	4	2.8	1.8	2.7	3.6	2.5	1.6	0.5	0.3	0.4	23.7
1.75	**7.4**	0	0.5	1.1	2	1.2	0.8	1.7	2	1.5	1	0.5	0.1	0	12.5
2.25	**13.3**	..	0.1	0.7	0.8	1.1	0.9	1.2	1.9	1.2	0.8	0.2	0.1	0.1	8.9
2.75	**15.8**	0	0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	1	0.6	0.5	0.2	0.1	0	4.4
3.5	**8.0**	..	0	0.2	0.4	0.3	0.3	0.5	0.7	0.6	0.5	0.1	0	0	3.7
4.5	**8.2**	..	..	0.1	0.1	0	0.1	0.2	0.2	0.3	0.2	0	0	..	1.1
5.5	**9.7**	..	..	0	..	..	0	0	0.1	0.1	0	0	..	..	0.3
6.5	**7.2**	..	..	..	..	..	0	..	0	0	..	..	..	..	0.1
Frecuencia total		1.4	4.9	10.8	17	10.2	6.8	10.6	13.5	9.7	7.5	3	2.3	2.3	

Tabla 3.3 – Tabla final de frecuencia de oleaje

3.3.4.3. Batimetrías sobre las que se propaga

Existen dos cartas batimétricas de interés que son utilizadas en este proyecto:

- **Carta 1 –** Corresponde a la carta Nº5 del SOHMA[1]. Esta carta, de escala 1:400.000 (35º 1'S) abarca desde faro del Chuy hasta puerto Sauce y cabo San Antonio (33º40'S – 36º22'S; 52º31'W – 57º28'W).

- **Carta 2 –** Corresponde a la carta Nº19 del SOHMA. Esta carta, correspondiente a la entrada al puerto de La Paloma, comprende todo el arco de playa que va desde punta Rubia hasta el cabo Santa María (34º35'24''S – 34º41'18''S; 54º05'00''W – 54º10'00''W). La escala de esta carta es 1:15.000 (34º38'S).

La carta 1, dentro de la cual está incluida el área en la cual han sido registrados los datos de oleaje, resulta de gran utilidad para realizar una primera propagación que permita cierto acercamiento a la costa. Sin embargo cerca de la costa la densidad de datos batimétricos que presenta esta carta resulta insuficiente para realizar una adecuada propagación del oleaje. Las razones por las que la información batimétrica de la carta 1 es inadecuada para propagar el oleaje en las cercanías de la costa son básicamente dos:

a) La primera y más importante está dada por el objetivo primero de este capítulo, el cual es determinar el clima de olas para varios puntos del arco de playa que va desde La Paloma hasta La Pedrera. Para ello es requisito básico que los distintos puntos sean claramente diferenciables en la carta batimétrica con la que se está realizando la propagación. Dado que estos puntos se encuentran a distancias del orden de los cientos de metros, es más que claro que una carta cuya escala 1:400.000 no permite una correcta diferenciación de los puntos de interés.

b) Adicionalmente, dada su gran escala, la carta 1 tiene extremadamente pocos datos de profundidad para el área de interés (tan solo 2 datos para todo el arco de playa). Con estos datos es imposible definir con precisión la batimetría del arco de playa, lo cual repercute de forma directa sobre los resultados de la propagación dada la gran influencia que tiene la profundidad sobre este fenómeno (principalmente cuando se está cerca de la costa).

De lo anteriormente dicho se concluye que es necesario realizar la propagación del oleaje hasta la costa sobre la base de la carta 2. Con esta carta es posible diferenciar con claridad los distintos puntos de interés y además se puede conocer con detalle las características de la batimetría a lo largo del arco de playa. Sin embargo es de esperar que varias de las olas registradas lleguen al dominio de la carta 2 ya afectadas por la propagación; por lo cual antes de realizar propagaciones sobre la base de la carta 2 es necesario realizar

[1] Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada de la Republica Oriental del Uruguay

propagaciones sobre la base de la carta 1, con el objetivo de conocer las características con que llega la ola al límite exterior de la carta 2.

3.3.4.4. Olas a ser propagadas sobre carta 1

En principio se puede pensar que es necesario propagar todas las olas a partir de la profundidad límite (aquella para la cual ya no es válido suponer comportamiento de aguas profundas), la cual está definida para cada ola a partir de su período como:

$$prof_{LIM} = \frac{gT^2}{4\pi}$$

Con esta relación se pueden determinar las profundidades a partir de las cuales habría que comenzar a propagar cada una de las olas definidas con anterioridad:

Período (s)	Profundidad límite (m)
5.0	19
5.8	26
7.4	43
13.3	138
15.8	195
8.0	50
8.2	52
9.7	73
7.2	40

Tabla 3.4 -

La profundidad media a la entrada de la carta 2 es aproximadamente 20m, por lo tanto aquellas olas cuyo período sea 5s bastará con propagarlas sobre dicha carta. Por otro lado todas aquellas olas cuyo período sea superior a 7.4s será necesario propagarlas sobre la carta 1 previo a propagarlas sobre la carta 2.

Quedan dudas sobre la necesidad de propagar las olas de período 5.8s sobre la carta 1, ya que su profundidad límite es muy cercana a la profundidad media en el borde exterior de la carta 2. De lo dicho en la sección 3.3 se deduce que para una profundidad de 20m el número de onda de una ola de 5.8s de período aumenta 1,5% (aprox.) respecto a su valor en aguas profundas; por lo cual se decide propagar las olas de 5.8s solamente en la carta 2, despreciando la posible afectación que pudiera existir sobre la ola por efecto de su propagación hasta la zona.

3.3.4.5. Modelos numéricos de los que se dispone

Se distinguen dos casos claramente distintos desde el punto de vista de los fenómenos involucrados:

- *La propagación del oleaje en la carta 1.* Aquí el fenómeno predominante es la refracción y en un segundo plano el asomeramiento y la pérdida de energía. Es claro que en este caso, dadas las grandes profundidades con las que se trabaja y que no existen obstáculos que generen zonas de sombra, los fenómenos de difracción y de rompiente son totalmente despreciables. Aquí las distancias a propagar son grandes, de cientos de kilómetros.

- *La propagación del oleaje en la carta 2.* En este caso entran en juego todos los fenómenos descritos en la sección 3.1, tomando gran importancia la difracción y la rotura del oleaje, fenómenos despreciables en el caso anterior. Por otro lado, a diferencia de lo que sucede en el caso anterior las distancias de propagación en este caso son menores a los diez kilómetros.

Es claro, vistas las diferencias existentes entre ambos casos, que hay que usar dos modelos diferentes en las propagaciones:

- por un lado, para propagar sobre la carta 1, se requiere un modelo relativamente sencillo, que no involucre más fenómenos que los estrictamente necesarios, y que permita manejar refracción y asomeramiento en grandes superficies.

- por otro lado para propagar en la carta 2 se requiere un modelo de mayor complejidad, que pueda manejar todos los fenómenos involucrados en la propagación. Si bien un modelo más complejo implica un mayor requerimiento de cálculo, ello se ve compensado por la disminución de las áreas sobre las que se requiere propagar.

Para el primer caso se opta por adaptar el modelo realizado en el curso Hidráulica Marítima (FING-UdelaR) del año 2004. Dicho modelo, denominado **SoloREF**, fue originalmente diseñado para propagar olas monocromáticas en dominios sencillos de algunos metros cuadrados. En marco de este proyecto se lo adaptó para manejar dominios cuyo tamaño es varios órdenes mayor y se le incluyó un sistema genérico que permite obtener la batimetría en cualquier región rectangular que esté incluida en la carta 1.

Para propagar el oleaje en la carta 2 se recurre a un modelo de uso libre, denominado RefDif, desarrollado por James T. Kirby y Robert A. Dalrymple. Este modelo ha sido ampliamente probado y es recomendado por el CEM.

A continuación se describen ambos modelos con mayor detalle.

a) SoloREF

El modelo surge de la aplicación de la teoría lineal de ondas de pequeña amplitud. Las hipótesis simplificatorias principales son:

- No existe disipación de energía.
- La frecuencia de la ola no varía (tren de olas estacionario).
- No se toma en cuenta el fenómeno de difracción.
- No se modela la rotura de la ola.

A partir de lo anterior se plantean las ecuaciones del modelo:

1. *Ecuación de dispersión* que relaciona la profundidad, la frecuencia y el número de onda: $\sigma^2 = gk\tanh(kh)$

2. *Ecuación de refracción,* que relaciona la variación del ángulo de propagación con la variación del número de onda: $\frac{\partial}{\partial x}\left(ksen\theta\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(k\cos\theta\right) = 0$

3. *Ecuación de la celeridad de grupo,* que da la velocidad con que se transmite la energía a partir de las características de la onda: $c_g = c\left(\frac{1}{2} + \frac{kh}{senh\left(2kh\right)}\right)$

4. *Ecuación de conservación de la energía,* que relaciona la variación de la altura de ola con la variación de la celeridad de grupo y la variación del ángulo de propagación:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(H^2 c_g sen\theta\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(H^2 c_g \cos\theta\right) = 0$$

Este modelo resuelve el sistema de ecuaciones planteado mediante diferencias finitas. La malla de puntos que utiliza es rectangular encajada, con pasos en *x* e *y* fijos.

Las entradas requeridas por el modelo son:

- La profundidad en cada punto de la malla
- Las características de la ola incidente (altura, período, dirección)

La salida del modelo incluye:

- Características del oleaje en cada punto de la malla (altura y dirección)
- Representación gráfica de los rayos sobre la batimetría
- Representación gráfica de la dirección y la altura de ola en cada punto mediante vectores

La disipación de energía en principio es totalmente despreciada en este modelo ya que su propósito original era el de propagar olas en pequeñas distancias. Sin embargo en este caso las distancias son muy grandes y por lo tanto la

disipación de energía no puede ser totalmente despreciada. Con el fin de no hacer el modelo más complejo, y bajo la hipótesis de que la disipación de energía no es un elemento central cuando se propaga en aguas relativamente profundas, es que la disipación de energía se agrega al final de la propagación, en forma desacoplada. A tal efecto se procede de la siguiente forma: una vez realizada una propagación con **SoloREF** se determina cual es el recorrido medio de la ola que llega al puerto de La Paloma. Una vez determinado dicho recorrido el mismo se divide en intervalos (dx) y para cada intervalo se calcula una profundidad media (h). Con estos datos y la altura de ola inicial se aplica la siguiente ecuación de disipación de energía:

$$a(dx) = \frac{a_0}{1 + a_0 \cdot \beta \cdot dx} \qquad \text{donde} \qquad \beta = \frac{4 \cdot C_r \cdot \sigma^3}{3 \cdot \pi \cdot g \cdot C_g \cdot senh^3(k \cdot h)}$$

Con:

a_0 es la amplitud de la ola antes de la disipación de energía (al entrar en el intervalo dx)
a(dx) es la amplitud de la onda luego de la disipación de energía (luego de recorrer el intervalo dx)
C_g es la celeridad de grupo
σ es la frecuencia de la ola
k es el número de onda de la ola
h es la profundidad media del intervalo dx
C_r es el coeficiente de disipación de energía, que en este caso en particular se toma igual a 10^{-2}

A partir de esta ecuación se tiene una relación entre la altura de ola inicial y la altura de ola final (coeficiente de decaimiento). Este coeficiente luego es aplicado a la altura de ola final resultante de la propagación realizada con **SoloREF** de modo de tener una altura de ola final corregida que tiene en cuenta, al menos de forma aproximada, el hecho de que existe disipación de energía por fricción con el fondo.

Para el coeficiente Cr se toma un valor relativamente bajo (igual a 10^{-2}). Esto se debe a que este modelo no tiene en cuenta la acción del viento, por lo cual en caso de poner un valor de disipación más elevado es probable que se tengan decaimientos mucho mayores que los reales para aquellas olas de gran altura generadas por vientos locales (y por ende que se propagan bajo la acción de esos mismos vientos).

Ventajas:

a) Al ser un modelo sencillo requiere poca capacidad de cálculo lo cual permite propagar el oleaje en grandes dominios en pocos minutos

b) Por ser de implementación propia es posible realizarle modificaciones de modo de lograr que se ajuste lo mejor posible a este caso en particular

Desventajas:

a) El modelo resulta poco realista cuando se está en situaciones donde los fenómenos predominantes son aquellos que no están incluidos en éste, como ser:
   i. Presencia de obstáculos que generen zonas de sombra
   ii. Zonas de rotura de ola, principalmente cerca de la costa
   iii. Zonas donde el modelo lineal de ondas de pequeña amplitud no sea adecuado, como por ejemplo aquellos casos en que la ola resulta ser muy empinada
   iv. Puntos en los cuales convergen los rayos de energía generando un fuerte incremento a la altura de ola. Aquí es central el fenómeno de difracción

b) Los resultados obtenidos con el modelo solo han sido comparados, de forma cualitativa, con una única experiencia de laboratorio.

b) REFDIF v2.6

Este es un modelo de propagación no lineal desarrollado por James K. Kirby y Tony Dalrymple[2]. El modelo original es del año 1982 pero aún hoy continúa en desarrollo.

En este proyecto se utiliza la versión Windows del modelo, implementada por Fengyan Shi[3]

Este es un modelo general de refracción y difracción. Tiene incorporados modelos lineales y no lineales de propagación, así como modelos de rotura de ola y de disipación de energía contra el fondo. En el manual del programa se incluye la descripción detallada del modelo, proporcionada por los creadores del mismo.

REFDIF resuelve la propagación del oleaje en una malla estructurada de paso *x* e *y* fijo. La malla original es subdividida en caso de requerirse mayor densidad de puntos para una correcta propagación. Adicionalmente REFDIF incluye la posibilidad de incorporar sub-mallas de mayor definición que permite obtener mejores resultados en el caso de pequeños obstáculos.

Las entradas requeridas por el modelo son:
- La profundidad en cada punto de la malla estructurada original
- Las características de la ola incidente (altura, período, dirección)
- Características de la pérdida de energía contra el fondo (laminar, turbulenta, por flujo a través del suelo). Dado que en el dominio de la carta 1 el fondo es puramente arenoso aquí se considera que la pérdida de energía contra el fondo se da por los flujos entrantes y salientes del suelo.

[2] Por más información dirigirse al sitio web del modelo http://chinacat.coastal.udel.edu/~kirby/programs/refdif/refdif.html
[3] Por más información dirigirse a http://www.coastal.udel.edu/~fyshi/

La salida del modelo incluye:

- Características del oleaje en cada punto de la malla (altura y dirección)
- Representación gráfica de la dirección y la altura de ola en cada punto mediante vectores

Ventajas:

a) Es un modelo sumamente preciso ya que involucra todos los fenómenos que se dan en la propagación del oleaje
b) El modelo está ampliamente probado y es recomendado por el US Army Corp of Engineers

Desventajas:

a) Por un lado la complejidad del modelo requiere que la distancia entre puntos de la malla sea relativamente pequeña para obtener buenos resultados (del orden de las decenas de metros); por otro lado la cantidad de puntos que puede manejar el modelo está acotada; de todo esto surge que el área de propagación que maneja el modelo está limitada y es del orden de 10km x 10km

b) Al no ser un modelo de desarrollo propio es utilizado tipo "caja negra", lo cual hace que sea relativamente difícil detectar y explicar comportamientos anómalos dada la limitada experiencia que se tiene en el manejo del mismo

3.3.5. Procedimiento de propagación

Para cada una de las direcciones originales presentadas en la **tabla 3.3** se procede de la siguiente manera:

1. Se propagan las olas con períodos 7.4s, 13.3s y 15.8s (alturas 1.75m, 2.25m y 2.75m respectivamente) desde el límite de la zona de registro más alejado de la costa hasta el límite de la carta 2. Esta propagación se realiza usando la carta 1 y el **SoloREF** (sin aplicar el coeficiente de decaimiento aún).

2. Aquellas olas cuya altura es mayor o igual a 3.5m no se propagan explícitamente. En este caso se aproximan las características de la ola tomando como referencia la propagación resultante de la ola de 7.4s de período. Esto supone que las olas de altura 3.5m o más llegarán al límite de la carta 2 con la misma dirección que las olas de 7.4s de período y con la misma relación altura inicial/altura final.

3. A todas las olas propagadas según 1 y 2 se les aplica un coeficiente de decaimiento. Dicho coeficiente se calcula para cada altura original

considerando un recorrido genérico correspondiente a la dirección original.

4. Ahora se toma todo el conjunto de olas: aquellas ya propagadas en la carta 1 y aquellas que aún no han sido propagadas (5s y 5.8s de período) y se las propaga, dentro de la carta 2, hasta la costa. Para esto se utiliza el **RefDif**.

5. A partir de los datos de salida que el RefDif arroja en cada propagación (que son la altura y la dirección de la ola en cada punto de la malla) se calcula el ángulo y la altura en la rotura (α_b y H_b) para cada uno de los puntos de interés (el procedimiento se puede ver en el **Anexo I**). A esta pareja ángulo-altura le corresponde la misma frecuencia de ocurrencia anual que la de la ola original con la que se comenzó la propagación.

3.3.6. Resultados obtenidos

Luego de propagado el oleaje se configura para cada uno de los puntos de la costa que se está estudiando una tabla H_b – α_b (altura de ola en la rompiente – ángulo relativo a la costa). En esta tabla a cada pareja H_b – α_b le corresponde una frecuencia anual de ocurrencia. Se debe notar que en estas tablas la suma de todas las frecuencias no es 100%, por lo tanto no está totalmente caracterizado el oleaje en la costa. Esto se debe a que para su elaboración no se han usado todos los datos de oleaje originales, sino que solamente se han utilizado aquellos datos de oleaje factibles de generar transporte de sedimentos en dirección al puerto (como ya se ha dicho en la sección 1). En la página siguiente se presentan las tablas obtenidas.

El signo del ángulo relativo a la costa se toma de forma tal que tenga coherencia con el signo que se le asigna al transporte de sedimentos. Si el observador se encuentra parado en la costa mirando hacia el agua entonces al transporte de sedimentos hacia la derecha se le asigna signo positivo y hacia la izquierda signo negativo. Para ser coherente con esto a las olas que inciden desde la izquierda del observador (que generan transporte hacia la derecha) se les asigna signo positivo, mientras que a aquellas que provienen de la derecha (que generan transporte hacia la izquierda) se les asigna signo negativo.

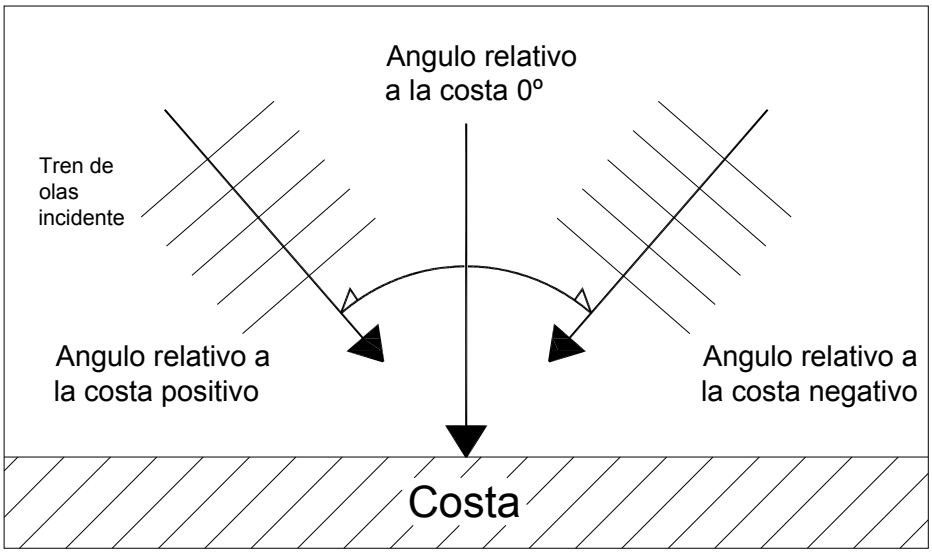


Figura 3.5 -

Punto A

Altura significativa en la rompiente (Hb)			Dirección relativa a la costa en la rompiente (alfa b)													Totales por altura
			90 a 30	30 a 25	25 a 20	20 a 15	15 a 10	10 a 5	5 a 0	0 a -5	-5 a -10	-10 a -15	-15 a -20	-20 a -25	-25 a -30	-30 a -90	
0	a	0,25	…	…	…	…	…	…	…	**4,9%**	…	…	**5,8%**	**1,3%**	…	…	**12,0%**
0,25	a	0,75	…	…	…	…	…	…	**4,4%**	…	…	**2,3%**	…	**1,2%**	…	**2,3%**	**10,2%**
0,75	a	1,25	…	…	…	…	…	…	**2,5%**	**1,1%**	**2,8%**	**4,0%**	**0,9%**	**2,7%**	…	…	**13,9%**
1,25	a	1,75	…	…	…	…	…	…	**2,7%**	**0,3%**	…	**1,2%**	**0,9%**	…	…	…	**5,1%**
1,75		o mayor	…	…	…	…	…	**0,1%**	…	**1,4%**	…	**1,5%**	**0,4%**	**0,3%**	…	…	**3,6%**
Totales por dirección			…	…	…	…	…	**0,1%**	**9,6%**	**7,7%**	**2,8%**	**9,0%**	**8,0%**	**5,3%**	…	**2,3%**	**44,7%**

Tabla 3.5 -

Punto B

Altura significativa en la rompiente (Hb)			Dirección relativa a la costa en la rompiente (alfa b)													Totales por altura
			90 a 30	30 a 25	25 a 20	20 a 15	15 a 10	10 a 5	5 a 0	0 a -5	-5 a -10	-10 a -15	-15 a -20	-20 a -25	-25 a -30	-30 a -90	
0	a	0,25	**3,7%**	…	…	…	…	…	…	…	…	**1,3%**	…	…	…	…	**5,0%**
0,25	a	0,75	…	**2,3%**	…	…	**4,4%**	**7,0%**	…	…	**1,2%**	…	…	…	…	…	**14,9%**
0,75	a	1,25	…	**2,5%**	…	…	**4,0%**	…	**2,3%**	**1,8%**	…	…	…	…	…	…	**10,6%**
1,25	a	1,75	…	…	**1,1%**	…	**0,4%**	**2,0%**	**4,9%**	**2,5%**	**1,1%**	…	…	…	…	…	**11,9%**
1,75		o mayor	…	…	**0,2%**	**0,1%**	**0,1%**	**0,4%**	**0,8%**	**0,4%**	**0,3%**	**0,1%**	…	…	…	…	**2,3%**
Totales por dirección			**3,7%**	**4,8%**	**1,3%**	**0,1%**	**8,9%**	**9,4%**	**7,9%**	**4,7%**	**2,6%**	**1,4%**	…	…	…	…	**44,7%**

Tabla 3.6 -

Punto C

Altura significativa en la rompiente (Hb)			Dirección relativa a la costa en la rompiente (alfa b)													Totales por altura
			90 a 30	30 a 25	25 a 20	20 a 15	15 a 10	10 a 5	5 a 0	0 a -5	-5 a -10	-10 a -15	-15 a -20	-20 a -25	-25 a -30	-30 a -90	
0	a	0,25	**3,7%**	…	…	…	**2,1%**	…	…	**1,3%**	…	…	…	…	…	…	**7,1%**
0,25	a	0,75	**2,3%**	…	**4,9%**	…	…	**2,3%**	…	**1,2%**	…	…	…	…	…	…	**10,7%**
0,75	a	1,25	**3,6%**	…	**5,1%**	**2,0%**	**2,8%**	**1,2%**	…	**1,8%**	…	…	…	…	…	…	**16,5%**
1,25	a	1,75	…	**4,4%**	**0,2%**	0,0%	**0,7%**	**2,3%**	…	…	**0,8%**	…	…	…	…	…	**8,5%**
1,75		o mayor	**0,3%**	0,1%	…	…	…	…	**0,4%**	**1,2%**	0,0%	…	…	…	…	…	**2,1%**
Totales por dirección			**9,9%**	**4,5%**	**10,2%**	**2,0%**	**5,5%**	**5,8%**	**0,4%**	**5,5%**	**0,9%**	…	…	…	…	…	**44,7%**

Tabla 3.7 -

Punto D

Altura significativa en la rompiente (Hb)			Dirección relativa a la costa en la rompiente (alfa b)													Totales por altura
			90 a 30	30 a 25	25 a 20	20 a 15	15 a 10	10 a 5	5 a 0	0 a -5	-5 a -10	-10 a -15	-15 a -20	-20 a -25	-25 a -30	-30 a -90	
0	a	0,25	…	**3,7%**	**4,9%**	…	…	…	…	**1,3%**	…	…	…	…	…	…	**9,9%**
0,25	a	0,75	**2,3%**	**4,4%**	…	…	**2,1%**	…	…	…	…	…	…	…	…	…	**8,9%**
0,75	a	1,25	**3,6%**	**4,0%**	…	…	**2,3%**	…	…	…	**3,0%**	…	…	…	…	…	**12,9%**
1,25	a	1,75	…	…	…	**0,7%**	**2,8%**	…	…	…	…	…	…	…	…	…	**3,4%**
1,75		o mayor	**0,7%**	**2,0%**	…	**1,0%**	**0,3%**	**2,7%**	**0,4%**	**0,3%**	**0,9%**	**1,3%**	…	…	…	…	**9,7%**
Totales por dirección			**6,7%**	**14,2%**	**4,9%**	**1,7%**	**7,4%**	**2,7%**	**0,4%**	**1,6%**	**3,9%**	**1,3%**	…	…	…	…	**44,7%**

Tabla 3.8 -

Punto E

Altura significativa en la rompiente (Hb)			Dirección relativa a la costa en la rompiente (alfa b)													Totales por altura
			90 a 30	30 a 25	25 a 20	20 a 15	15 a 10	10 a 5	5 a 0	0 a -5	-5 a -10	-10 a -15	-15 a -20	-20 a -25	-25 a -30	-30 a -90	
0	a	0,25	**8,6%**	…	…	…	…	**1,3%**	…	…	…	…	…	…	…	…	**9,9%**
0,25	a	0,75	**9,2%**	…	**2,1%**	…	…	**1,2%**	…	…	…	…	…	…	…	…	**12,5%**
0,75	a	1,25	**7,8%**	…	**2,3%**	…	…	**2,7%**	…	…	…	…	…	…	…	…	**12,7%**
1,25	a	1,75	**0,2%**	…	**2,8%**	…	…	**0,9%**	…	…	…	…	…	…	…	…	**3,9%**
1,75		o mayor	**0,7%**	**0,8%**	**1,2%**	**0,7%**	**2,0%**	**0,3%**	…	…	…	…	…	…	…	…	**5,8%**
Totales por dirección			**26,6%**	**0,8%**	**8,4%**	**0,7%**	**2,0%**	**6,3%**	…	…	…	…	…	…	…	…	**44,7%**

Tabla 3.9 -

Cabe aclarar que para el punto A los resultados de la propagación no son del todo confiables. En particular los resultados obtenidos de la propagación de las olas con dirección original 30º, que son los de mayor interés por ser las olas con mayor potencial de transportar sedimentos hacia dentro del puerto, son los resultados que mayores problemas plantean para el punto A. Al observar la representación grafica de los resultados de estas propagaciones se puede observar que en la zona correspondiente al punto A se tienen algunos puntos cuya dirección de propagación es absurda desde el punto de vista físico. En la figura siguiente se muestra, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos en la zona A al propagar una ola con dirección original 30º.

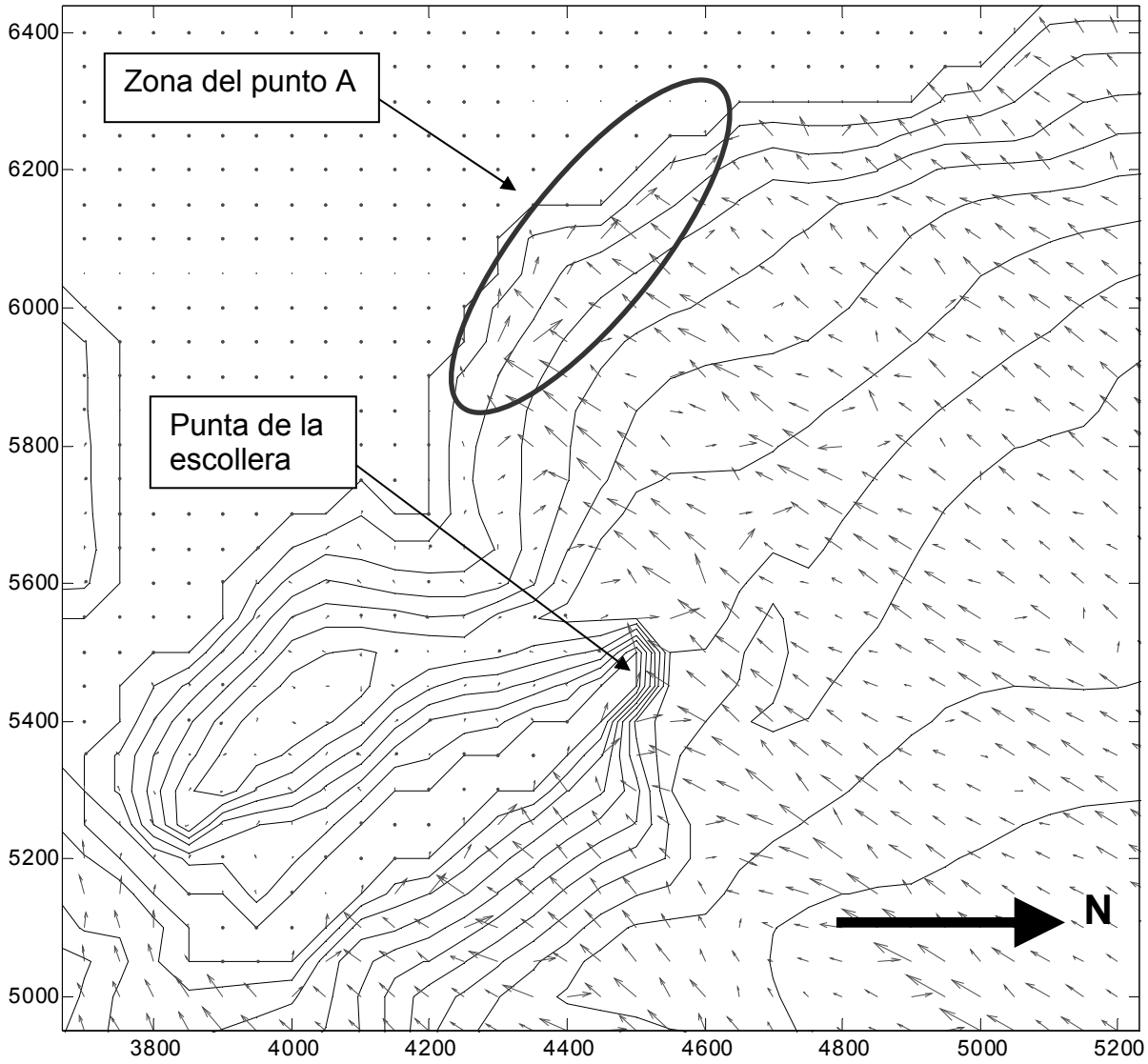


Figura 3.6 -

3.3.7. Conclusiones de la propagación del oleaje

Se observa que para los puntos B a E existe una mayor frecuencia de olas con ángulo relativo a la costa positivo. Esto lleva a pensar que el transporte de sedimentos es mayor en dicha dirección (esto se calcula más adelante). Sin embargo no hay que perder de vista el hecho de que aquí se han propagado hasta la costa aquellas olas que se considera pueden transportar sedimentos en dicha dirección y se han omitido el resto.

En general se puede decir que los resultados que se obtienen son confiables para los puntos B a E, sin embargo en cuanto al punto A quedan serias dudas. Al ser esta una etapa intermedia en el proceso de diagnóstico del problema no resulta razonable descartar desde ya los resultados obtenidos para el punto A. Sin embargo, sí se deberá tener en cuenta las observaciones hechas cuando se realice la evaluación y diagnóstico final.

3.4. Transporte de sedimentos

3.4.1. Introducción y objetivos

Para poder verificar la hipótesis original, según la cual el problema del aterramiento del puerto está generado por el transporte litoral que se produce en dirección al mismo, se debe proceder a contrastar el transporte litoral potencial con los volúmenes de arena que entran efectivamente al puerto. A fin de poder hacer esto se plantea como objetivo el estimar, a partir de los datos disponibles de las propagaciones llevadas a cabo en la sección anterior, el volumen anual de arena que podría entrar al puerto de La Paloma debido al transporte litoral; esto es calcular el transporte litoral potencial anual en dirección sur que ocurre entre La Aguada y el puerto.

3.4.2. Conceptos generales

3.4.2.1. Zona de rompiente

Al aproximarse las olas a la costa y reducirse la profundidad permaneciendo incambiado el período, la pendiente del oleaje (relación H/L) aumenta, llegando a un valor límite en el que la ola pierde estabilidad y rompe. Al romper disipa grandes cantidades de energía, a la vez que genera un importante transporte de masa, induciendo corrientes cercanas a la costa y aumentando el nivel medio del agua a partir de la misma. A la zona en donde se dan estos fenómenos se le llama zona de rompiente y se extiende desde la línea de rompiente hasta el borde de la playa. La particularidad de los fenómenos que allí se producen hace que no sea posible analizar esta zona como al resto del mar con la teoría de olas de pequeña amplitud, justificándose su estudio de forma independiente.

3.4.2.2. Corrientes cercanas a la costa

La capacidad de transporte de una playa estará dada por la capacidad que tengan las corrientes que allí se den para poner en movimiento el material que conforma la playa. En la zona de rompiente se producen distintos fenómenos, que generan corrientes de distintas escalas, direcciones y frecuencias. La superposición de todas ellas da la resultante neta de corriente, que puede considerarse como la composición lineal de las mismas:

$$u = u_w + u_t + u_a + u_o + u_i$$

Donde u_w es la corriente producida por la rompiente, u_t la producida por las mareas, u_a la producida por los vientos locales y u_o y u_i las corrientes oscilatorias causadas por las olas de viento y de infragravedad.

En la figura siguiente puede verse un ejemplo real de comportamiento de corriente cercana a la costa extraído del CEM.

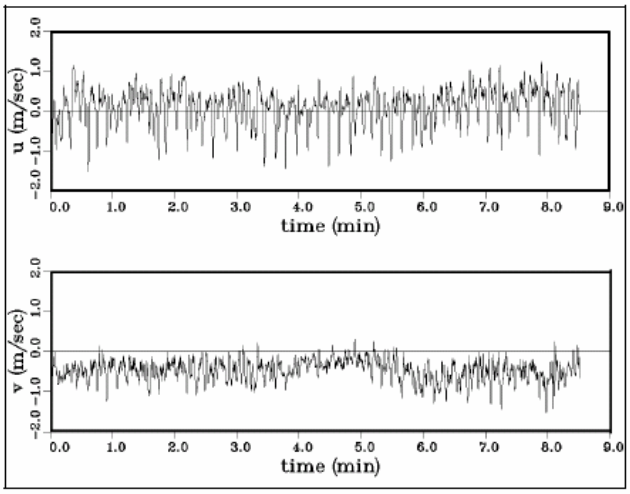


Figura 3.7 -

En la figura puede apreciarse como tanto la corriente resultante paralela (v) como la perpendicular a la costa (u), están compuestas por la superposición de efectos de distinta frecuencia. Es así que el valor medio está asociado a los efectos estables de la corriente causada por rompiente y por los vientos, la oscilación de período largo es producida por las corrientes inducidas por las oscilaciones de infragravedad, y las oscilaciones de períodos más cortos son producidas por las pequeñas oscilaciones orbitales producidas por el viento.

En el caso de bahías cerradas o estuarios puede llegar a tener cierta importancia la componente debida a mareas, sin embargo en playas abiertas (como en el caso de estudio) tienen un papel preponderante las corrientes producidas por la rompiente. Durante las tormentas, que implican fuertes vientos, es posible que las oscilaciones medias estén generadas en mayor medida por acción del viento. En cualquier caso, éstos serían eventos particulares, disminuyendo en importancia cuando se están considerando fenómenos que abarcan períodos medianamente largos de tiempo.

Las ecuaciones de momento y de continuidad gobiernan el movimiento del agua dentro de la zona de rompiente. Al aplicarse se presentan del siguiente modo:

$$U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}=-g\frac{\partial \overline{\eta}}{\partial x}+F_{bx}+L_x+R_{bx}+R_{sx}$$

$$U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}=-g\frac{\partial \overline{\eta}}{\partial y}+F_{by}+L_y+R_{by}+R_{sy}$$

$$\frac{\partial(Ud)}{\partial x}+\frac{\partial(Vd)}{\partial y}=0$$

Donde:

U es la velocidad media perpendicular a la costa
V es la velocidad media paralela a la costa

F_{bx} , F_{by} son la fricción de fondo perpendicular y paralelas a la línea de costa

L_x , L_y son las componentes de la mezcla lateral

R_{bx} , R_{by} son las componentes de la fuerza de las olas

R_{sx} , R_{sy} son las componentes de la fuerza generada por viento

$\bar{\eta}$ es la elevación media del agua por encima del nivel medio del agua en reposo (“setup”)

En estas ecuaciones puede verse cómo las corrientes son generadas tanto por las olas, el viento, los gradientes de presiones causados por el setup, la fricción de fondo y las corrientes de mezcla lateral.

El setup es la sobre elevación del nivel medio de la superficie del agua por encima del nivel que tendría si estuviese en reposo. Esto implica que la altura real del nivel medio del agua es la suma de la altura del agua en reposo más el setup. Este término surge por compensación de la cantidad de movimiento en la dirección de propagación de la ola, ya que la sobre elevación produce un gradiente de presiones que compensa el flujo neto de momento en la zona de rompiente.

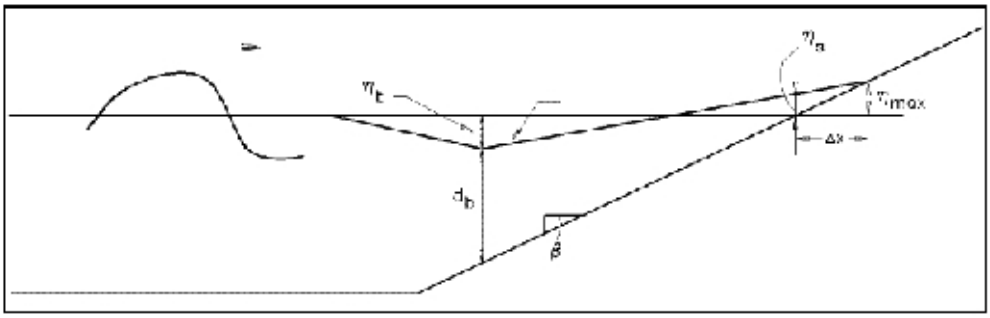


Figura 3.8 -

El principal forzante del movimiento es el flujo de momento causado por la rompiente de las olas, que induce tanto corrientes paralelas como perpendiculares a la costa. Este flujo es proporcional al cuadrado de la altura de la ola, por lo que será mayor para olas de mayor amplitud. La fricción de fondo dependerá tanto de la velocidad de la corriente como de la rugosidad del mismo. La mezcla lateral es el cambio de momento causado por corrientes de turbulencia.

Todas estas fuerzas dan como resultado patrones de circulación en la zona de rompiente que están estrechamente relacionados con la forma de la costa. Es así que en zonas en donde la costa presenta una forma recta, a las que llegan olas oblicuamente, se producirá simplemente un movimiento paralelo a la costa en el sentido en el que incide la ola. En cambio, cuando la costa presenta salientes, pueden producirse corrientes de retorno que retiren sedimentos de la playa. Estas corrientes también pueden darse ante un cambio brusco en la magnitud de la corriente litoral.

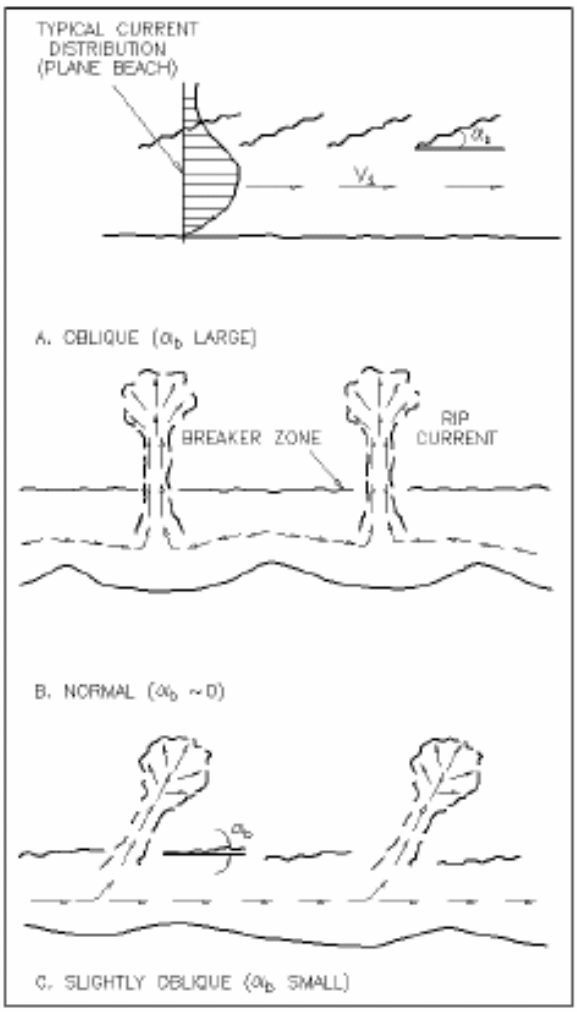


Figura 3.9 -

A continuación se describirán las tres formas de transporte en la zona de rompiente: las corrientes de retorno, la corriente perpendicular a la costa y la corriente litoral.

a) Corriente de retorno

Las corrientes de retorno, así como las celdas de circulación, pueden ser generadas por variación en el setup producido por las olas. La altura de la ola en la rompiente y la magnitud del setup están estrechamente relacionadas; por lo tanto, cuando por una variación paralela a la costa en la profundidad del fondo cambia la altura de la rompiente, cambiará también el setup. Esta diferencia en puntos contiguos genera un flujo representado en la ecuación de conservación del movimiento como $\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y}$, que resulta en una dirección del flujo desde la zona de mayor a la de menor setup.

Estas celdas de circulación que así se producen cambian constantemente de lugar, al cambiar la forma de la costa o la incidencia de las olas. Si bien las corrientes de retorno pueden llegar a tener una magnitud importante, cobrarán

mayor importancia aún ante una estructura costera impermeable, como un espigón, en donde el fenómeno se dará siempre en el mismo lugar y con una intensidad mayor. Otro efecto común es el que se da en muchos puertos, incluyendo el de La Paloma. En esta situación un sector de la playa se encuentra a la sombra del rompeolas o escollera, dando lugar a una diferencia de setup que induce corrientes constantes en dirección a la zona de sombra.

Es importante señalar que así como la forma de la playa induce cambios en la dirección de las corrientes, de forma recíproca estas corrientes generan modificaciones en la costa.

b) Corriente perpendicular a la costa

Si bien los fenómenos físicos implicados en la generación de la corriente perpendicular a la costa son los mismos que aparecen en el origen de la corriente litoral, estas corrientes no suelen estudiarse en conjunto sino de forma independiente. Esto es en parte porque los intereses de estudio son distintos, ya que las corrientes perpendiculares a la costa están íntimamente relacionadas con los cambios en el perfil de playa, mientras que la corriente litoral está más asociada a cambios de la forma en planta. Al transporte provocado por la corriente perpendicular a la costa se lo suele dividir en dos clases: el que tiene un efecto constructivo, esto es que hace “aumentar” el perfil de playa engrosando la zona de playa seca, y el destructivo, que suele por el contrario retirar la berma y hacer más tendida la playa. En su fase constructiva el proceso se desarrolla de forma gradual, involucrando volúmenes reducidos de arena en tiempos relativamente grandes; por el contrario, la fase destructiva suele traer aparejado un volumen de acarreo de sólidos importante en un único episodio de tormenta.

c) Corriente litoral

Como se describió anteriormente, el transporte litoral es el transporte paralelo a la línea de playa. Es particularmente importante para este trabajo su estudio por ser la principal causante del transporte de sedimentos a lo largo de la costa, y por ser también el principal agente de cambio de la forma en planta de la playa.

Hay varios indicadores cualitativos acerca de la magnitud y dirección del transporte de sedimentos en una playa. Por un lado la forma en planta de la misma da una idea clara de la dirección del transporte, y en ocasiones puede llegar a dar una idea cualitativa de los volúmenes implicados. Por otro lado la variación en el tamaño de los granos puede indicar un transporte en el sentido en que los mismos disminuyen; de cualquier modo ninguno de estos dos indicadores deben ser tomados de forma definitiva, ya que pueden haber otros factores influyendo. En particular la distribución granulométrica puede estar afectada por aportes locales de sedimentos desde el continente, o por cambios en la energía del oleaje a lo largo de la playa.

Como se ha indicado anteriormente la zona de principal movimiento de sedimentos es la zona de rompiente. Sin embargo puede ser interesante saber,

en particular para el diseño de elementos de retención de arena, si dentro de la misma el transporte se da de forma homogénea. Según lo señalado en el CEM, hay estudios que indican que a pesar de que la distribución de sólidos en suspensión, tomado como indicador de los sedimentos acarreados, se da de forma bastante homogénea, ésta tiende a concentrase en las cercanías a la rompiente y en la swash zone[4], dependiendo de la forma en que rompe la ola incidente. En las cercanías de la rompiente suele acarrearse entre un 10% y un 20% del transporte total, mientras que en la swash zone se tiene de un 5% a un 60% del total dependiendo de que la rompiente se de en forma de descrestamiento ($\varepsilon < 0.5$) o de colapso ($\varepsilon > 3.3$)[5].

3.4.3. Estimación del transporte litoral

La complejidad del proceso de transporte litoral hace que sea muy difícil la deducción de formulaciones teóricas que expliquen cabalmente los fenómenos físicos involucrados. Adicionalmente, la validación de las formulaciones existentes no es tarea sencilla por dos razones: en primer lugar la escasez de instrumental que permita cuantificar el transporte litoral (en general se hace midiendo el volumen acumulado en espigones u obras similares) y en segundo lugar los efectos de escala hacen que la reproducción en laboratorio del fenómeno no sea totalmente satisfactoria. Todo esto a su vez dificulta también deducir o validar por ensayos fórmulas empíricas. A pesar de esto se ha llegado a una serie de fórmulas que pueden llegar a predecir con cierto grado de aproximación los volúmenes arrastrados. Estas fórmulas, si bien tienen una base física, presentan una dependencia muy fuerte de parámetros tabulados experimentalmente. En el presente trabajo se utilizan los métodos recomendados por el CEM. Estos son métodos de Flujo de energía, con distintas formas de estimar el coeficiente que interviene, y el método “Corriente litoral” de Longuet-Higgins.

3.4.3.1. Estimación del transporte potencial

Interesa calcular la cantidad de arena que es movida en una zona dada de una playa, esto es el volumen de arena que atraviesa una cierta sección en un período de tiempo; o sea, el caudal de arena que atraviesa una sección de control. En vez de calcularse el volumen es conveniente trabajar con el peso sumergido I_l de este acarreo:

$$I_l = \rho_{sol} g \frac{Vol_{sol}}{\Delta t} - \rho g \frac{Vol_{sol}}{\Delta t} = (\rho_{sol} - \rho) g (1-n) Q_l$$

[4] La Swash Zone es la zona de la playa sobre la que actúan las olas y se extiende desde el máximo nivel alcanzado por el agua en la playa hasta el mínimo (para un estado de mar dado).

[5] En donde $\varepsilon = \frac{tg(\beta)}{\sqrt{H_o / L_o}}$ es el número de Iribarren, con H_o la altura de ola en aguas profundas, L_o la longitud de la onda en aguas profundas, y β la pendiente de la playa.

Por lo que $Q_l = \dfrac{I_l}{(\rho_{sol} - \rho) g (1-n)}$

con Q_l caudal potencial de sólidos arrastrados.
n porosidad de los sedimentos.
ρ_{sol} densidad de los sólidos arrastrados.
ρ densidad del agua.

Los siguientes métodos estiman un caudal potencial. Si por algún motivo (existencia de espigas, espigones, rompeolas, cañones submarinos, etc.) se enlentece o interrumpe el transporte de arena, éste no se dará en las cantidades estimadas; por lo que el caudal estimado será una cota superior de la cantidad de arena que puede llegar a ser arrastrada, y solo se dará en caso de existir en abundancia y de no ser obstaculizada de manera alguna.

3.4.3.2. Método de flujo de energía

Este método supone que I_l es proporcional al flujo de energía en la rompiente (P_l):

$I_l = KP_l$ (1) con K una constante adimensional a estimar.

P_l se calcula con la teoría de olas como: $P_l = (EC_g)_b \operatorname{sen}\alpha_b \cos\alpha_b$ (2)

Con E la energía en la rompiente, C_g la celeridad de grupo y α_b el ángulo de incidencia relativo a la costa de las olas.

A su vez: $E_b = \dfrac{\rho g H_b^{\,2}}{8}$ (3) y $C_{gb} = \sqrt{g d_b} = \sqrt{g \dfrac{H_b}{k}}$ (4) con d_b la profundidad en la rompiente y $k = H_b / d_b$ el índice de rompiente.

Sustituyendo (2), (3) y (4) en (1).

$$I_l = K(EC_g)_b sen\alpha_b \cos\alpha_b = K\left(\frac{\rho g^{3/2}}{8k^{1/2}}\right) H_b^{5/2} sen\alpha_b \cos\alpha_b = K\left(\frac{\rho g^{3/2}}{16k^{1/2}}\right) H_b^{5/2} sen2\alpha_b$$

$\Rightarrow$ como $Q_l = \dfrac{I_l}{(\rho_{sol} - \rho) g (1-n)}$

$$\Rightarrow Q_l = K\left(\frac{\rho\sqrt{g}}{16k^{1/2}(\rho_{sol} - \rho)(1-n)}\right) H_b^{\,5/2} \operatorname{sen} 2\alpha_b$$

De esta forma el caudal de sólidos transportados depende de las características del oleaje (H_b, α_b, k), de la forma de la playa (k), de la arena disponible (ρ_{sol} y n) y por último del parámetro K. Como se puede apreciar en la fórmula, la dependencia con este parámetro es muy grande, por lo que la estimación correcta del mismo resulta de gran importancia.

3.4.3.3. Estimación de K

a) K propuesto por CEM

Basado en métodos computacionales se encontraron buenos resultados asumiendo K=0.39. Este resultado fue hallado con arena cuarzosa bajo las siguientes condiciones:

$D_{50} = 0.2 - 1.0mm$

$d_b = 0.5 - 2m$

Su aplicación fuera de estos rangos se aconseja sea tomada con mucha cautela, y en cualquier caso solo en etapas primarias de factibilidad o anteproyecto.

b) Fórmula de Bailard

Bailard (1981-1984) observó una fuerte dependencia del tamaño del grano y la constante K. De esta forma desarrolló un modelo de laboratorio encontrando que K dependía de: el ángulo en la rompiente, la relación entre la velocidad orbital y la velocidad de sedimentación de las partículas (w_f). Es así que propuso la siguiente fórmula:

$$K = 0.05 + 2.6\,\mathrm{sen}^2 2\alpha_b + 0.07\frac{u_{mb}}{w_f}$$

donde u_{mb} es la máxima en la magnitud de la velocidad orbital y se calcula, a partir de la teoría de aguas poco profundas, como $u_{mb} = \frac{k}{2}\sqrt{gd_b}$, donde k es la razón entre la altura de ola en la rompiente H_b y la profundidad en la rompiente d_b (en general k=0.78).

Bailard obtuvo su fórmula a través de ensayos de laboratorio efectuados con arenas y olas de las siguientes características, por lo que deben, al igual que en el caso anterior, tomarse en cuenta para el uso de la fórmula:

$w_f = 2.5 - 20.5cm/seg$

$\alpha_b = 0.2° - 15°$

$u_{mb} = 33 - 283cm/seg$

También hay que tener en cuenta que estos resultados fueron obtenidos con escasos ensayos de laboratorio, por lo que aún dentro de estos rangos deben tomarse los resultados que se obtengan con cierta prudencia, ya que una mala

estimación de este parámetro puede llegar a cambiar notoriamente los resultados finales del transporte de sedimentos.

c) Del Valle, Medina y Losada (1993)

Del Valle, Medina y Losada desarrollaron a través de datos experimentales presentados por Komar (1988) y datos experimentales propios (basados en observaciones visuales y de fotos aéreas de más de 30 años del delta del río Adra en España) una fórmula netamente experimental que también tiene en cuenta el tamaño del grano medio.

$$K = 1.4e^{-2.5D_{50}}$$

Esta relación está basada también en una limitada cantidad de datos. En particular el D_{50} de los datos experimentales está comprendido entre 0.1 y 1.5mm.

3.4.3.4. Método de corriente litoral

Una variante al método del flujo de energía es el presentado por Walton (1980-1982). En este método no se calcula el flujo de energía como en el anterior, sino que se hace con:

$$P_l = \frac{\rho g H_b W V_l C_f}{\left(\frac{5\pi}{2}\right)\left(\frac{V}{V_0}\right)} \quad [1]$$

en donde W es el ancho de la zona de rompiente, V_l es la velocidad de la corriente litoral medida a una distancia Y de la costa, C_f coeficiente de fricción que depende del coeficiente de Reynold y de la rugosidad relativa del fondo (0.01 según datos de laboratorio), y V_0 es la velocidad litoral teórica a la rotura.

La distribución de velocidades para una playa con un perfil lineal es calculada por Longuet-Higgins y es de la forma:

$$\left(\frac{V}{V_0}\right) = 0.2\left(\frac{Y}{W}\right) - 0.714\left(\frac{Y}{W}\right)\ln\left(\frac{Y}{W}\right)$$

en donde Y es la distancia entre la corriente medida y la línea de costa.

La ventaja que presenta esta forma de estimación es que no requiere conocer el ángulo de incidencia de las olas. En vez de esto se requiere medir en un punto dado la velocidad de la corriente, lo que puede ser más fácil de medir que la ola incidente.

Si se cuenta con datos del oleaje incidente y no de la velocidad de la corriente, puede estimarse esta última a través de la primera. Para esto pueden usarse la relación obtenida por Komar e Inman (1970):

$$V_{mb} = 1.17\sqrt{gH_{rmsb}}\, sen\alpha_b \cos\alpha_b$$

Con:

- V_{mb} la velocidad de la corriente en la mitad de la zona de rompiente (Y=W/2)media en al rompiente.
- H_{rmsb} la altura cuadrática en la rompiente.
- α_b el ángulo de incidencia de las olas con respecto a la costa.

Tomando V_l igual a V_{mb} y tomando Y=W/2 se calcula P_l con la formula [1].

3.4.4. Transporte litoral en arco La Paloma - La Pedrera

Las propagaciones realizadas dan como resultado que una importante cantidad de olas llegan a la costa oblicuamente, generando corriente litoral. Esta corriente tiene el potencial de transportar una cantidad importante de arena en suspensión. Por otro lado al romper las olas de forma oblicua arrojan estas partículas violentamente en la dirección de avance de las mismas y retornan luego por las zonas de máxima pendiente. Esto produce un efecto de zig-zag que también da como resultado una componente de transporte paralelo a la playa.

Figura 3.10 – Foto de la playa ubicada entre La Aguada y el puerto de La Paloma

Así como el ángulo y la energía del oleaje cambian periódicamente, también es esperable que la cantidad de arena transportada varíe con el tiempo. Esta variación suele hacer que en un mismo punto, durante una época del año se produzca transporte en una dirección y durante otra época hacia la otra.

En este caso interesa estimar, en una primera instancia, la cantidad de arena que ingresa al puerto. Si bien para algunos problemas es posible que interese el transporte neto, en este caso tan solo interesa estimar el transporte producido por aquellas olas incidentes con posibilidad de generar transporte hacia el puerto. Con este resultado, a partir de la frecuencia de ocurrencia de estas olas, se estima el transporte anual en cada dirección en algunos de los puntos de la playa definidos anteriormente: en el punto A y en el punto B. El transporte se calcula tan solo en estos puntos porque es en dicha zona en donde se define la cantidad de arena que entra al puerto.

Usando los resultados de la sección anterior y las granulometrías presentadas en el capítulo 2 se procede al cálculo del transporte mediante los distintos métodos presentados.

Las granulometrías a usar son:

	A	B
	Muelle 3	La Aguada
D50 (mm)	0.09	0.13

Tabla 3.10 -

Para calcular el transporte se utilizan los dos métodos presentados (método del flujo de energía y método de la corriente litoral) y ambos se aplican con el K recomendado por el CEM (K_{SPM}) y con el K calculado (mediante Bailard y Del Valle et al.), específicamente a partir de los datos de granulometría de los puntos A y B.

A continuación se muestran tan solo los transportes anuales en dirección al puerto que se obtienen para los puntos A y B.

		Transporte en A (m^3)	Transporte en B (m^3)
Método del flujo de energía	K_{SPM}	30,406	337,766
	Bailard	74,870	682,620
	Del Valle et al.	36,947	371,373
Método de la corriente litoral	K_{SPM}	55,679	618,524
	Bailard	137,103	1,250,028
	del Valle et al.	67,658	680,066

Tabla 3.11 – Transporte litoral potencial para los puntos A y B

Claramente en el punto A se obtienen transportes de un orden menor que aquellos que se obtienen para el punto B.

3.4.5. Conclusiones

Según se dice en la sección 3.3.7 existe la sospecha de que los datos que se usan para el cálculo del transporte de sedimentos en el punto A no sean correctos. Si se observa con cierto cuidado la zona señalada de la figura 3.6 se puede ver el error que se menciona en la sección 3.3.7. Dicho error, que se origina en la propagación del oleaje mediante RefDif, consiste en la existencia de puntos cuya dirección de ola es absurda, como ser oleajes con dirección paralela a la costa o inclusive saliente de la misma. Estas direcciones paralelas a la costa que se encuentran en los resultados de las propagaciones en el punto A no son aleatorias; por el contrario en general toman dirección norte, o sea dirección opuesta al puerto. Esto lleva a pensar que el transporte potencial en dirección al puerto en el punto A que se obtiene en la sección 3.4.4 se encuentra subvaluado, ya que para el mismo se han usado los resultados de las propagaciones con los errores ya mencionados. Esto por lo tanto implica que los resultados obtenidos en el punto A a lo sumo pueden ser usados como cota inferior del transporte litoral potencial.

Por otro lado los resultados de transporte que se obtienen para el punto B son más confiables dado que los datos que se usan para su cálculo no presentan los problemas que se mencionaron para el punto A. Sin embargo no es válido usar los transportes calculados en el punto B para estimar el transporte potencial en dirección al puerto ya que la orientación de la costa en B es distinta a la de A. Para lo que se usan aquí los resultados obtenidos en B es para acotar superiormente el transporte en dirección al puerto.

Para el punto B los transportes litorales potenciales calculados con los distintos métodos van desde aproximadamente 350.000m^3/año hasta 1.250.000m^3/año. Para saber cual de estos valores se ajusta más a la realidad uno debe referirse a la sección siguiente en la cual se estima el ingreso anual de arena al puerto a partir de datos batimétricos y de volúmenes dragados. Conociendo ya los resultados de la sección siguiente se puede concluir que el método que mejor ajusta el transporte litoral en dirección al puerto es el del Flujo de energía aplicado tanto con el coeficiente recomendado por el CEM como con el calculado con la fórmula de Del Valle et al. Resulta por lo tanto un transporte potencial en dirección al puerto en el punto B de orden 300.000m^3/año.

La conclusión final de la sección 3.3 es por lo tanto que el volumen anual que ingresa al puerto por transporte litoral está acotado superiormente por $3x10^5 m^3$, siendo este el valor aproximado del transporte litoral potencial en la zona de La Aguada, e inferiormente por $3x10^4 m^3$/año, que es el valor obtenido para el punto A con los errores ya mencionados.

3.5. Estimación del volumen de arena que ingresa al puerto

3.5.1. Objetivo

El objetivo de este capítulo es estimar la cantidad de arena que ingresa al puerto de La Paloma en un período dado a partir de datos de cartas batimétricas y de datos de dragado, y poder contrastar estos resultados con los resultados que se obtienen con la teoría de propagación de oleaje y transporte de sedimentos.

Para poder realizar tal estudio se obtuvieron en la Dirección Nacional de Hidrografía una serie de cartas batimétricas para diferentes años en los cuales se efectuaron dragados. Estas cartas fueron realizadas inmediatamente antes de cada dragado, por lo que se pude estimar la cantidad de arena presente en el puerto antes de los mismos.

Con la cantidad de arena en el puerto antes de cada dragado junto con la cantidad de arena extraída en cada uno de estos se estima la cantidad de arena que ingresó al puerto entre dos dragados sucesivos y, a partir de esto, el caudal medio de ingreso de arena al puerto.

Este caudal medio no necesariamente se corresponde con el caudal medio anual de entrada de arena al puerto dado que el espaciamiento temporal entre dragados no necesariamente es un año; por lo que en principio no es trivial inferir cuanta arena ingresará al puerto anualmente. Esta dificultad radica en el hecho de que la cantidad de arena que ingresa al puerto no es lineal con el tiempo (eventualmente, si no se draga el puerto llegaría a un equilibrio, por lo que no ingresaría más arena). A su vez, la hipótesis de la no-linealidad del ingreso de arena indica que la cantidad de arena que ingresa en un determinado período depende también de la condición inicial de aterramiento del puerto. Es claro que si el puerto está en equilibrio no ingresa arena, mientras que si se draga un gran volumen de arena el caudal de entrada de arena será mayor.

Además, climatológicamente no todos los períodos inter-dragados son idénticos (particularmente cuando los lapsos entre dragados son cortos)

Esta hipótesis lleva a ajustar los datos obtenidos en las cartas batimétricas y los datos de dragado a una curva que permita inferir cuanta arena ingresa al puerto en un período dado con un estado inicial dado.

El objetivo final es obtener una estimación lo más ajustada posible del volumen anual de arena que entra al puerto para compararlo con los volúmenes anuales de transporte potencial y, de esta forma, tener elementos que permitan la confirmación de la hipótesis original, según la cual, el aterramiento del puerto es provocado por el transporte litoral en dirección al puerto.

3.5.2. Ingreso de arena entre dragados

Aquí se pretende estimar el ingreso de arena al puerto a partir de los datos de dragado y de las batimetrías del puerto realizadas antes de los dragados.

En primer lugar para estimar la cantidad de arena presente en el puerto a partir de las cartas batimétricas se procedió de la siguiente manera.

Se trazaron líneas rectas en las cartas batiméricas, perpendiculares a la escollera principal hacia dentro del puerto distanciadas 50m entre sí. Para cada una de las líneas se halla la distancia a la cual está cada curva de nivel dentro del puerto medida desde la escollera. Esto permite trazar un perfil del puerto cada 50m.

A continuación se observa el perfil del puerto medido 200 metros adentro del puerto a partir de la punta exterior de la escollera en Octubre de 1984.

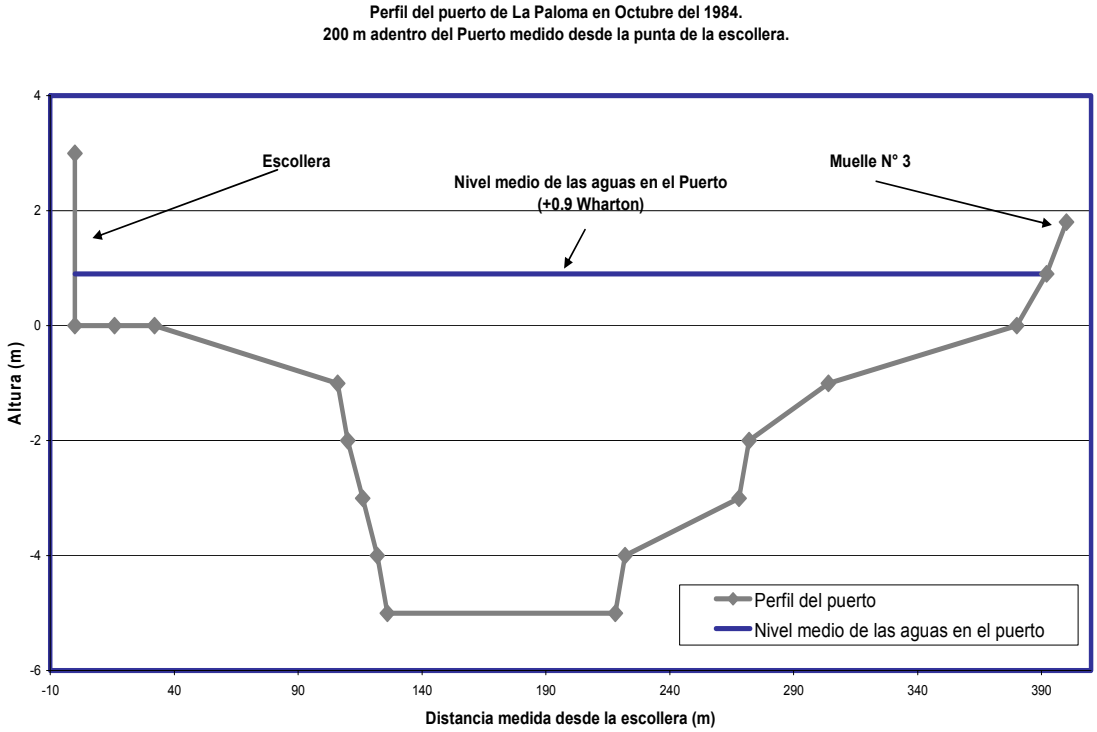


Figura 3.11 - Perfil del puerto en Octubre de 1984 200m adentro de la punta exterior de la escollera.

Obsérvese a la derecha del gráfico, en el muelle 3, como el aterramiento está +0.9m por encima del nivel medio de las aguas, impidiendo inclusive el amarre de embarcaciones de pequeño calado.

Para estos perfiles se estima el área ocupada por arena medida desde el –7m Wharton. Esta área se calcula como una suma de trapecios de la siguiente manera.

$$A_i = \sum \frac{(C_i + C_{i+1})}{2} dx$$

donde:

C_i = cota medida desde el -7m Wharton de la curva de nivel i [m], siendo i=0 la curva de nivel más cercana a la escollera
d_x = distancia entre la curva de nivel i y la curva de nivel i+1 [m]

A través de estos perfiles se estima el volumen de arena que hay entre dos perfiles sucesivos (siempre espaciados 50 m) como:

$$Vol_{i-i+1} = \left(\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right) * \Delta x$$

donde:

A_i = área de arena presente en el perfil i medida desde el –7m Wharton [m^2]
Δx = distancia entre perfiles consecutivos (50m en todos los casos).

Y a partir de esto se estima la cantidad total de arena en el puerto como:

$$V_T = \sum_{1}^{12} Vol_{i-i+1}$$

donde:

Vol_{i-i+1} = volumen de arena entre el perfil i y el i+1 medido desde el –7m Wharton (m^3)

Se trabaja sobre 6 cartas batimétricas (a saber: Abr 81, Mar 82, Dic 83, Oct 84, Set 85 y Set 86). Se trabaja con estas cartas por ser todas realizadas previamente a la actividad de dragado y, a su vez, por ser de años consecutivos.

En la tabla siguiente se muestran los volúmenes de arena presentes en el puerto inmediatamente antes de cada dragado, los volúmenes dragados y por diferencia los volúmenes de arena remanentes en el puerto después de los dragados.

Fecha	Aterramiento inicial (10^3 m^3)	Dragado (10^3 m^3)	Aterramiento luego del dragado (10^3 m^3)
Abr-81	1061,1	233,4	827,7
Mar-82	970,0	99,1	870,8
Dic-83	991,8	248,4	743,4
Oct-84	1005,5	193,4	812,1
Set 85	980,1	58,8	921,3
Set 86	983,5	58,2	925,3

Tabla 3.12 - Aterramiento antes y después de cada dragado y volúmenes de dragado

A partir de estos datos y considerando que se draga en el mismo mes en el que se efectúa la carta batimétrica, se realiza un gráfico en el que se muestra el volumen de arena presente en el puerto a lo largo del tiempo. La pendiente de cada una de las curvas indica el caudal promedio de arena que ingresa al puerto.

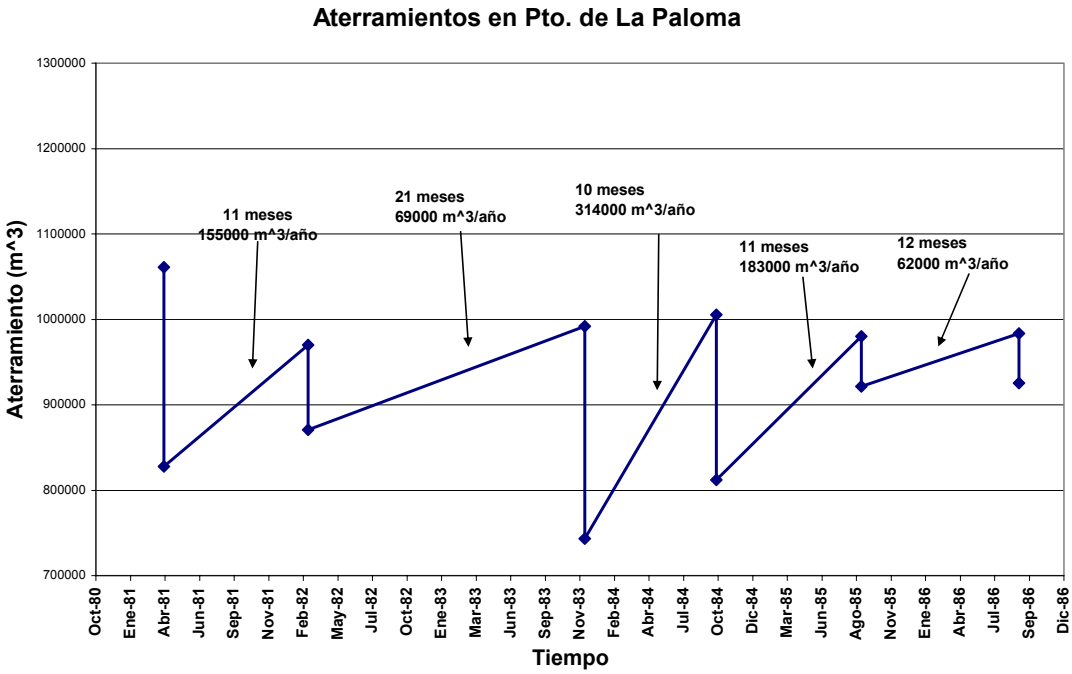


Figura 3.12 - Volumen de arena Tiempo entre Abril de 1981 y Setiembre 1986.

A partir del gráfico anterior se verifican al menos de forma cualitativa las hipótesis manejadas en este capítulo en cuanto al caudal de arena que ingresa al puerto. En el gráfico se puede ver que cuanto mayor es el tiempo entre dragados el caudal promedio de arena ingresado (la pendiente de las rectas) disminuye, a su vez, cuanto mayor es el volumen de arena remanente en el puerto después de un dragado, el caudal promedio de arena que ingresa entre dragados también disminuye.

3.5.3. Ajuste a una curva no-lineal múltiple

Bajo la hipótesis que el ingreso de arena al puerto no se da a tasa constante, si no que por el contrario el mismo depende de la condición de aterramiento existente en el puerto, se concluye que el volumen total de arena que entra al puerto es una función del tiempo en que entra arena y de la condición inicial de aterramiento. Está función, claro está, es desconocida. Para al menos tener una aproximación de la misma que permita sacar algunas conclusiones en cuanto al ingreso anual de arena al puerto se realiza un ajuste de los datos disponibles a una curva no lineal múltiple de tres parámetros.

La curva no lineal múltiple de tres parámetros considerada es de la forma:

$$V = A \cdot t^{B} \cdot V_0^{\,C}$$

donde:

V = volumen de arena que ingresa en un tiempo t y con una condición inicial de aterramiento V_0
t = tiempo en el cual se quiere evaluar la entrada de arena

Para poder ajustar los datos a la curva se toma el logaritmo neperiano a ambos lados de la ecuación, obteniendo:

$$Ln(V) = Ln(A) + B \cdot Ln(t) + C \cdot Ln(V_0)$$

Luego, tomando:

$$Ln(V) = V'$$
$$Ln(A) = A'$$
$$Ln(t) = t'$$
$$Ln(V_0) = V_0'$$

Se obtiene:

$$V' = A' + B \cdot t' + C \cdot V_0'$$

Pudiendo resolverse esta ecuación como una ecuación lineal múltiple donde V', t' y V_0' son las variables y A', B y C los parámetros a determinar.

El sistema de tres ecuaciones y tres incógnitas es:

1) $$\sum V' = A' \cdot n + B \cdot \sum t' + C \cdot \sum V_0'$$

2) $$\sum (t' \cdot V') = A' \cdot \sum t' + B \cdot \sum (t')^2 + C \cdot \sum \left(V_0' \cdot t' \right)$$

3) $$\sum \left(V_0' \cdot V' \right) = A' \cdot \sum V_0' + B \cdot \sum \left(t' \cdot V_0' \right) + C \cdot \sum \left(V_0' \right)^2$$

Donde n es la cantidad de ternas (V',t',V_0') obtenidas de las batimetrías del puerto y de los datos de dragado a las cuales se pretende que ajuste la función no lineal.

En estas condiciones, los datos a ajustar son los siguientes:

Fecha	Vo (10^3m^3)	t meses	V (10^3 m^3)
Abr-81	828	11	142
Mar-82	871	21	121
Dic-83	743	10	262
Oct-84	812	11	168
Sep-85	921	12	62

Tabla 3.13 - Datos utilizados para el ajuste a una curva no lineal múltiple

Tomando logaritmo neperiano se obtiene:

Fecha	Vo´ = Ln (Vo)	t´ = Ln (t)	V´ = Ln (V)
Abr-81	6,72	2,40	4,96
Mar-82	6,77	3,04	4,80
Dic-83	6,61	2,30	5,57
Oct-84	6,70	2,40	5,12
Sep-85	6,83	2,48	4,13

Tabla 3.14 - Datos utilizados para el ajuste a una curva lineal múltiple

De esta manera las ecuaciones a resolver son:

1) $24.58 = 5 \cdot A' + 12.63 \cdot B + 33.62 \cdot C$
2) $165.11 = 33.62 \cdot A' + 84.97 \cdot B + 226.15 \cdot C$
3) $61.86 = 12.63 \cdot A' + 32.25 \cdot B + 84.97 \cdot C$

Obteniéndose:

$$\left.\begin{array}{l} A' = 51.68 \Rightarrow A = \exp(A') = 2.78 \times 10^{22} \\ B = -7.098 \\ C = 0.383 \end{array}\right\} \Rightarrow V = 2.78 \times 10^{22} \cdot t^{0.383} \cdot V_0^{\,-7.098}$$

Para estimar la bondad del ajuste se utilizan tres métodos, el método gráfico, el método del error cuadrático medio y el coeficiente de correlación.

a) Ajuste gráfico

Para visualizar el ajuste mediante el método gráfico se traza la superficie que describe la función de ajuste utilizando Matlab y se ingresan los puntos con los cuales se halló la función y los cuales se pretende que ésta ajuste.

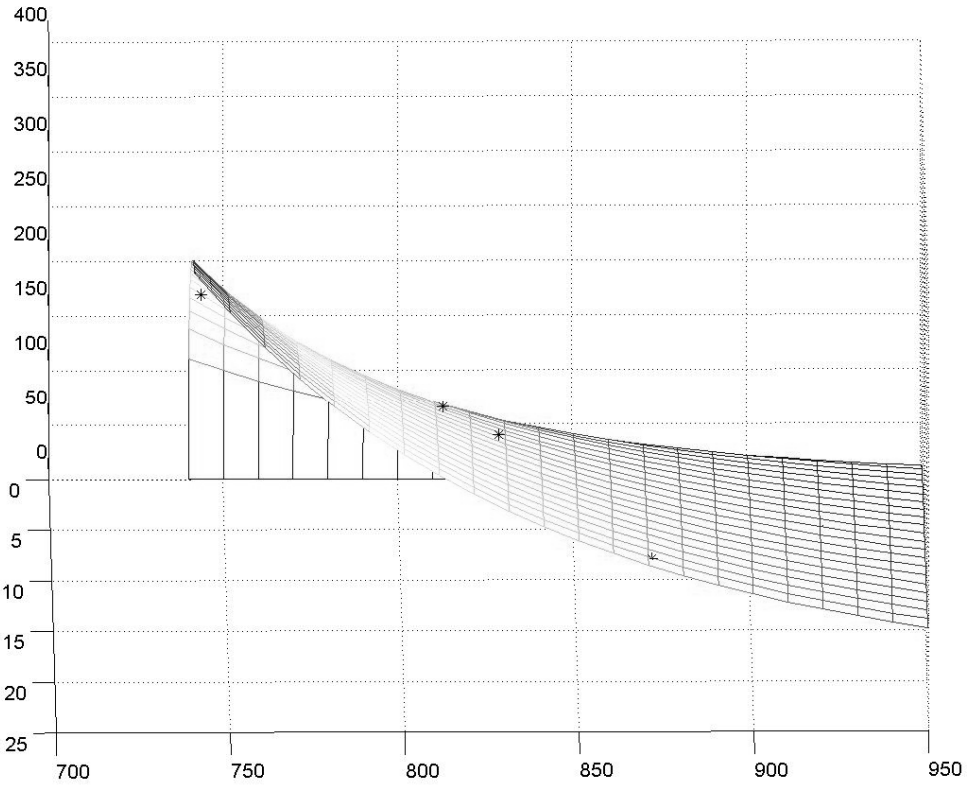


Figura 3.13 - Ajuste gráfico de la superficie que describe la función hallada y los puntos utilizados para ajustar la función

El ajuste gráfico no aporta demasiados elementos comparativos más allá de la visualización esquemática del ajuste. Hay un punto que no se distingue por quedar levemente por debajo de la superficie.

b) Error cuadrático medio

Para evaluar el error cuadrático medio se utiliza la ecuación:

$$Error\,cuadratico\,medio = \sqrt{\sum_i \left(V_{est} - V_i\right)^2}$$

De esta manera se obtiene:

Error cuadrático medio				
Vo (10^3 m^3)	V (10^3 m^3)	t (meses)	Vest (10^3 m^3)	(Vest-V)^2
828	142	11	136	42
871	121	21	121	0
743	262	10	281	342
812	168	11	155	158
921	62	12	66	12
		Error C. Medio =		**10,53**

Tabla 3.15 - Error cuadrático medio

c) Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación en una regresión no lineal múltiple se define como:

$$R^2 = 1 - \frac{S^2_{v-v_0 t}}{Var_v}$$

con

$$S^2_{v-v_0 t} = \frac{1}{n-3}\sum_i (V_i - V)^2$$

donde:

Var_v = varianza de los valores de V medidos (aterramiento entre dragados).
V_i = estimación de los aterramientos entre dragados para V_{0i} y t_i.
n = cantidad de ternas (V, t, V_0) ajustadas.

El coeficiente de correlación tiene un mínimo en -∞ y un máximo en +1, donde +1 representa un ajuste perfecto entre la variable observada y la variable estimada. La ventaja de este parámetro es su carácter de medida relativa.

A continuación se presentan los datos a los cuales se les realiza el ajuste.

Aterr inicial (10^3 m^3)	Aterr ingresado (10^3 m^3)	Meses	Aterr estim (10^3 m^3)	(At ing-At est)^2
828	142	11	136	42
871	121	21	121	0
743	262	10	281	342
812	168	11	155	158
921	62	12	66	12

Tabla 3.16 - Datos utilizados para evaluar el coeficiente de correlación

Entonces:

$Var_v = 5371$
$S^2_{v-v_0 t} = 277$
$R^2 = 0.948$

El coeficiente de correlación tan próximo a 1 indica el buen ajuste de la curva a los datos medidos.

Se observa que a pesar de la bondad del ajuste, la pequeña cantidad de datos utilizados para la aproximación hace poco confiable el ajuste si se quisiera trabajar con mayor precisión en cuanto a los volúmenes de arena. De todas maneras, en este caso a los efectos de evaluar la cantidad de arena que ingresa en un año con una condición inicial de aterramiento dada interesa tener un dato aproximado para que pueda ser comparado con los resultados teóricos obtenidos, no justificándose ni un estudio más detallado ni la búsqueda de nuevos datos.

A su vez, se observa en una serie de estudios efectuados por la Dirección Nacional de Hidrografía entre 1906 y 1962 la gran influencia que tienen las grandes tormentas en la entrada de arena al puerto. En particular, en el temporal del 16 de Abril de 1914 se constató que ingresaron unos 125.000m^3 de arena. Este factor no es evaluado en esta aproximación, pudiéndose obtener diferencias significativas entre los volúmenes estimados de entrada de arena y los medidos para un año en particular debido a esto.

3.5.4. Estimación del ingreso anual de arena

Luego de ajustar la curva a los datos obtenidos resta definir el tiempo entre dragados y la condición inicial de aterramiento para la cual se evaluará la aproximación.

Para el caso del tiempo entre dragados se supone razonable tomarlo 12 meses. De esta manera se dejan de lado muchos de los ciclos estacionales que puedan estar presentes en los fenómenos de ingreso de arena, siendo a su vez un período razonable entre dragados teniendo en cuenta los volúmenes de ingreso de arena al puerto y la pérdida de amarras utilizables que se producen en el puerto debido a este fenómeno.

El estado inicial de aterramiento se estima calculando el promedio de los estados iniciales de aterramiento obtenidos a partir de las cartas batimétricas del puerto. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Fecha	Aterramiento inicial (10^3 m^3)
Abr-81	827,7
Mar-82	870,8
Dic-83	743,4
Oct-84	812,1
Sep-85	921,3
Promedio = 835100 m3	

Tabla 3.17 - Aterramientos iniciales para las diferentes fechas consideradas y promedio de estos aterramientos

A partir de este aterramiento inicial se calcula el volumen de arena ingresado al puerto como:

$$Vanual = 2.78 \times 10^{22} (12)^{0.383} (835.1)^{-7.098}$$

Donde el tiempo está en meses y el aterramiento inicial en miles de metros cúbicos. De esta manera el volumen ingresado en un año sería:

$$Vanual = 131.8 \times 10^3 \, m^3$$

Estimación del caudal instantáneo:

El caudal instantáneo de ingreso de arena al puerto se halla derivando con respecto al tiempo la función hallada anteriormente y evaluándola para un tiempo dado y una condición inicial dada.

Este valor es de gran utilidad para estimar el caudal de dragado necesario para dejar constantemente el puerto en las condiciones deseadas.

La derivada con respecto al tiempo de la función de volumen ingresado es:

$$Q = 1.065 \times 10^{22} t^{-0.617} (Vo)^{-7.098}$$

Donde Q está en miles de metros cúbicos por año, t en meses y Vo en miles de metros cúbicos.

De esta manera, el caudal instantáneo para el volumen inicial estimado (835.000m3) y un tiempo de un mes es:

$$Q_0 = 1.065 \times 10^{22} (1)^{-0.617} (835.1)^{-7.098}$$

$$Q_0 = 233.4 \times 10^3 \, m^3/_{año} = 640 \, m^3/_{día}$$

Esto significa que si se quisiera operar el puerto manteniendo las condiciones iniciales mencionadas anteriormente durante todo el año habría que dragar constantemente a una tasa promedio de 640 m3/día. De todas maneras, las condiciones aceptables para la operación del puerto serán definidas por el operador del puerto, pudiendo no ser las supuestas, y por tanto, pudiendo cambiar el caudal a dragar constantemente.

3.5.5. Conclusiones

El volumen de arena que entra anualmente (en promedio) al puerto de La Paloma es aproximadamente $1.3 \times 10^5 m^3$. Esto claramente es del mismo orden que la cota superior definida en la sección 3.4.5 para el transporte litoral potencial: $3 \times 10^5 m^3$. También se observa que el volumen que entra anualmente es mayor que el resultante del transporte litoral en el punto A, lo cual es coherente con lo que se dice en la sección 3.4.5 en cuanto a la cota inferior del transporte en dirección al puerto.

La conclusión final que se desprende de las secciones 3.4 y 3.5 es que el aterramiento del puerto está ocasionado por el transporte litoral de arena, el cual a su vez está generado por el conjunto de olas cuya dirección original en aguas profundas es 30º y 60º.

Finalmente esto habilita a la búsqueda de una solución al problema del aterramiento del puerto bajo la hipótesis original de que el mismo esta generado por el transporte litoral de arena.

3.6. Estudio del equilibrio del arco de playa

3.6.1. Introducción

Son pocas las líneas de costa totalmente rectas. La gran mayoría de ellas toman distintas formas curvas con distintos nombre (bahía, golfo, mar) según sea su tamaño y el volumen de agua encerrada. En el caso particular del arco de playa que va desde La Paloma hasta La Pedrera se puede hablar de una bahía.

La gran mayoría de las costas reciben oblicuamente y de forma persistente olas de mar de fondo, estando determinadas por los patrones de viento globales, los cuales son aproximadamente constantes (tienen un comportamiento climático determinado). Se ha observado que las playas tienden a formarse transversalmente a este mar de fondo. Tanto es así que la orientación de las bahías suele ser un excelente indicador de la dirección del transporte neto de sedimentos en una determinada zona.

Bajo la influencia de dicho oleaje una playa puede encontrarse en equilibrio o no. Se dice que una playa está en equilibrio si ésta conserva su línea de costa a lo largo del tiempo. En caso de estar en equilibrio éste puede ser dinámico o estático. El equilibrio estático es aquel para el cual los flujos de arena que entran y salen del sistema (considerando como sistema a la bahía) son mínimos. En contraposición, en el equilibrio dinámico se mantiene la línea de costa como consecuencia de un balance de flujos de arena entrantes y salientes para el cual no existe ni pérdida ni acumulación de arena en el sistema.

La forma de la línea de costa de la bahía de La Paloma es una de las más comunes en la naturaleza y ha sido ampliamente estudiada, recibiendo diferentes nombres por diferentes autores (bahía en forma de zeta, bahía medio corazón, bahía media luna, playa en espiral, etc.). En esta sección se hace uso de un modelo sencillo que permite sacar algunas conclusiones cualitativas respecto al estado de equilibrio de esta bahía.

Más adelante se estudian algunas fotos aéreas de las que se dispone, de forma tal de complementar las conclusiones derivadas de la aplicación del modelo.

El tercer y último análisis que se hace en esta sección está orientado a definir si los volúmenes de arena dragados son despreciables en el análisis de la forma de la costa o si su magnitud es tal que merecen ser considerados en dicho análisis.

3.6.2. Objetivo

El objetivo principal de esta sección es definir en que condiciones se encuentra la bahía que va desde la Paloma hasta La Pedrera en cuanto a su equilibrio. Para esto se utiliza el método de la parábola, que se explica en la sección 3.5.3.

A priori se plantean tres posibilidades: equilibrio estático, equilibrio dinámico y retroceso de la línea de costa. Cabe destacar que existen evidencias de que en algunas zonas la playa se encuentra en retroceso, como ser el deterioro de las edificaciones y de la caminería existentes debido al ataque del oleaje que, en el pasado, no alcanzaba dichas estructuras.

Una vez definida la condición en que se encuentra la línea de costa el siguiente objetivo es verificar dicha condición a partir del análisis de las fotos aéreas. En caso de que la condición definida en el primer análisis sea la de retroceso de la línea de costa se plantea como objetivo cuantificar dicho retroceso mediante el estudio de las fotos aéreas.

El último objetivo de este capítulo es determinar si es posible que los dragados que se llevan a cabo en el puerto estén influenciando la forma de la costa o no.

3.6.3. Método de la parábola

En este método se da por sentado que se conoce la dirección predominante con la que llega a la bahía el mar de fondo, siendo a su vez el mar de fondo el oleaje que determina la forma general de la playa.

Suponiendo conocida la dirección predominante del mar de fondo se procede a determinar la *"línea de control"* (R_0). Dicha línea se define como aquella que une los dos cabos, o puntos duros, que limitan la bahía. El cabo de aguas arriba, considerando como aguas arriba el lugar por donde llega el oleaje, es el responsable de la difracción del oleaje.

Una vez definida la línea de control se puede determinar uno de los parámetros fundamentales del modelo, el ángulo que forma el tren de olas incidente con la línea de control (β).

Por otro lado en el cabo de aguas abajo, si la bahía está en equilibrio estático, el ángulo que forma la línea de control con el tren de olas debe ser igual al que forma la costa en dicho punto con la línea de control. Esto es así porque en caso de estar la bahía en equilibrio la línea de costa en la zona de aguas abajo debe orientarse de forma paralela al tren de olas incidente. Es importante destacar que en caso de que la costa no esté en equilibrio aún es posible que la línea de costa sea paralela al tren de olas incidente. En dicho caso la subsiguiente erosión necesaria para alcanzar el equilibrio ocurrirá a profundidades mayores y no en la línea de costa.

A partir de estos dos parámetros característicos de la geometría de la bahía el método de la parábola define la siguiente ecuación para determinar la forma de la bahía en condición de equilibrio estático:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1\left(\frac{\beta}{\theta}\right) + C_2\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2$$

Esta ecuación parabólica está definida en coordinas polares. La misma toma como origen del radio al punto de difracción (cabo de aguas arriba) y mide los ángulos tita a partir del tren de olas incidente.

Los coeficientes C_0, C_1 y C_2 dependen solamente del ángulo de incidencia del mar de fondo. El siguiente ábaco muestra dicha dependencia:

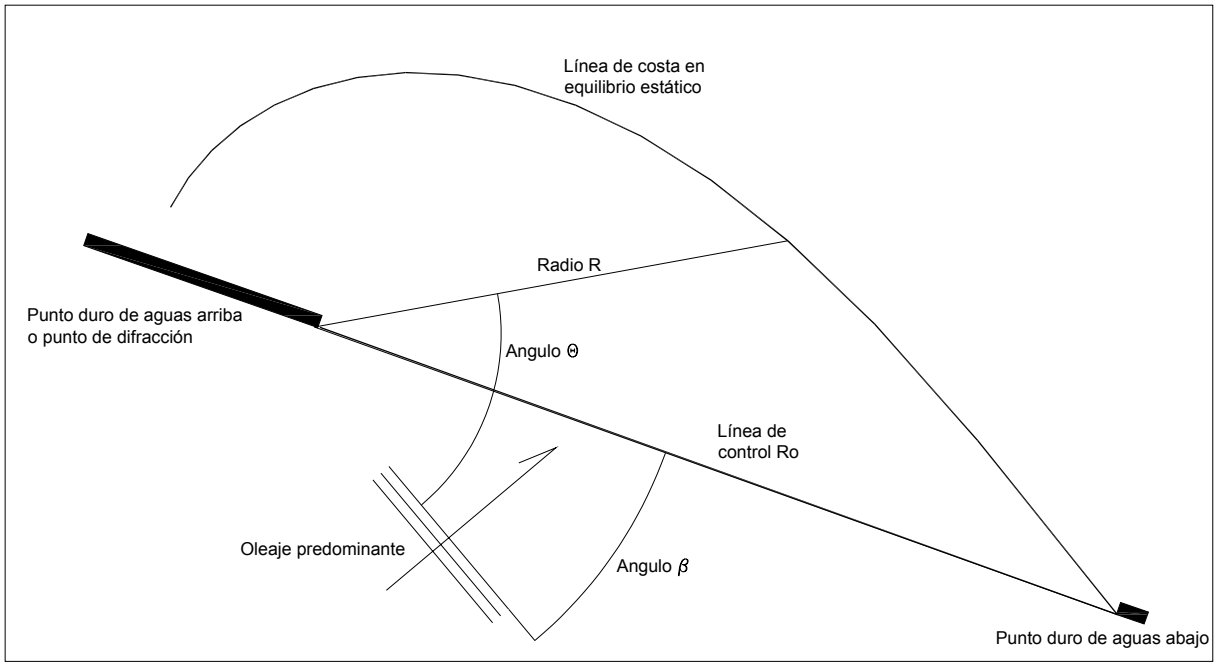


Figura 3.14 – Esquema de los parámetros del método de la parábola

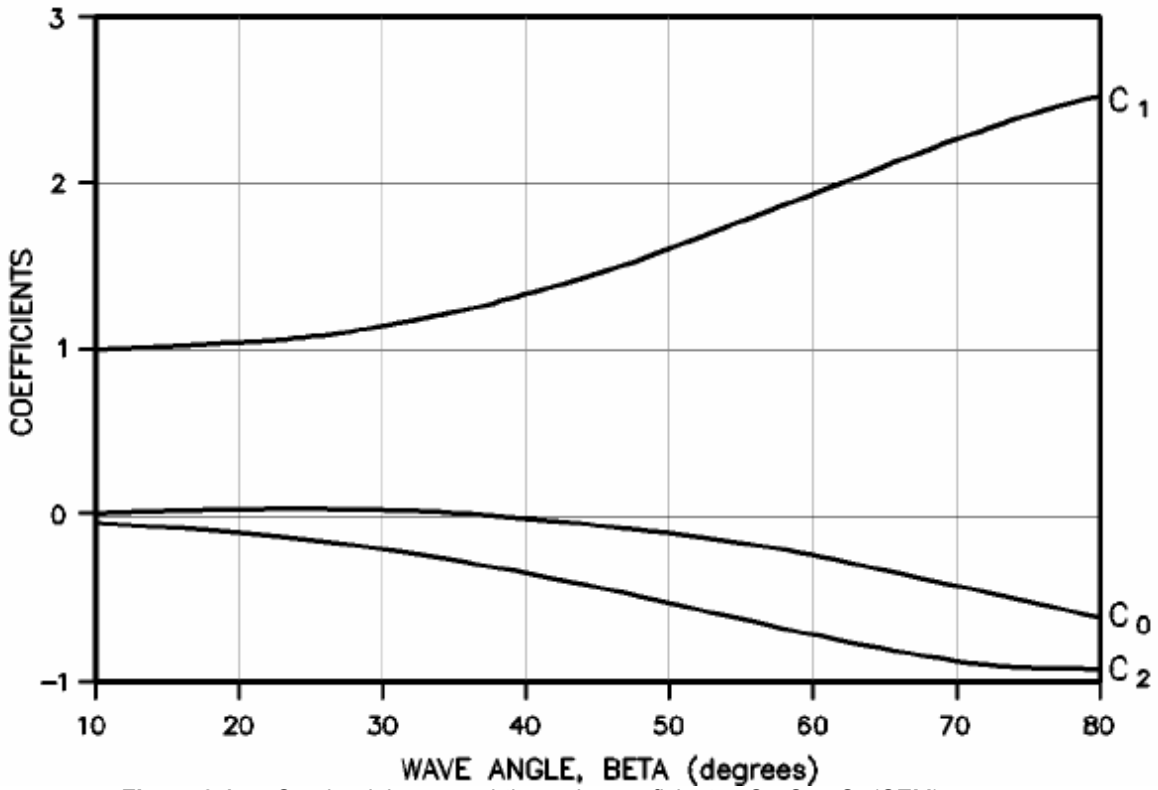


Figura 3.15 – Cuadro del que se obtienen los coeficientes C_0, C_1 y C_2 (CEM)

3.6.4. Aplicación del método a la bahía La Paloma – La Pedrera

Para poder aplicar este método, que permite definir la forma de la bahía que va desde La Paloma hasta La Pedrera en situación de equilibrio estable, se debe determinar por un lado cual es la dirección predominante del oleaje y por otro cuales son los cabos o puntos duros que están determinando la forma de la playa.

El punto duro de aguas abajo es claro que está localizado en La Pedrera. Allí afloran aproximadamente 500m de una formación rocosa (zócalo del este) y esto claramente funciona como barrera para los sedimentos provenientes desde el sur de la playa.

Definir el punto duro de aguas arriba no resulta tan sencillo ya que el punto de difracción depende de la dirección con que se aproxime a la bahía el oleaje predominante, sin embargo una vez determinada la dirección del oleaje predominante la definición del punto de difracción no presenta ninguna dificultad.

3.6.4.1. Oleaje predominante

Para definir el oleaje predominante que actúa sobre la bahía definiendo la forma de la misma se plantean dos caminos: definir la dirección del oleaje predominante a partir de la tangente a la costa en la zona de La Pedrera, suponiendo que en dicha zona la línea de costa ya se encuentra próxima al equilibrio, o calcular la ola media incidente a partir de los datos de oleaje disponibles.

El primero de los métodos se apoya en el hecho, ya mencionado, de que no es condición necesaria el que la bahía esté en equilibrio estable para que la costa en la zona cercana al punto duro de aguas abajo sea transversal a la dirección predominante. A partir de la carta, tomando la perpendicular a la costa en la zona de La Pedrera, se encuentra que la dirección predominante es **140°**, como se puede ver en la figura:

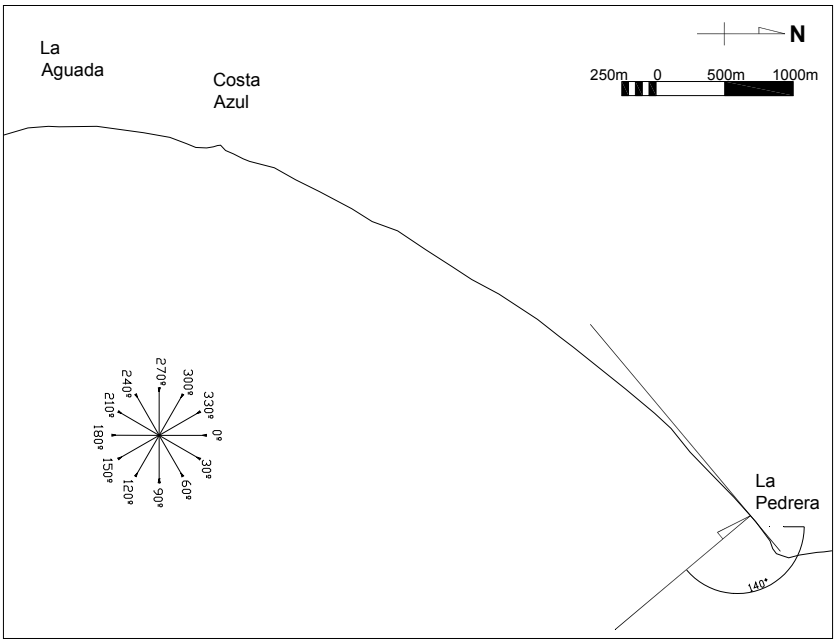


Figura 3.16 – Angulo de costa en la playa de La Pedrera

Para calcular el oleaje predominante a partir de los datos de oleaje disponibles se utilizan tan solo aquellas olas que se considera pueden tener influencia sobre el arco de playa, estas son aquellas con dirección original comprendida entre los 30° y los 210°.

Dado que el método de la parábola está definido para las características predominantes del oleaje en la zona inmediatamente exterior a la bahía (donde se intercepta con el punto de difracción) entonces para definir el oleaje predominante se usan los resultados obtenidos de las propagaciones realizadas con SoloREF.

Aquí se plantean, nuevamente, dos opciones: utilizar todos los registros de oleaje, sin intentar distinguir entre las tormentas locales y el mar de fondo; utilizar tan solo los registros de olas definidos como mar de fondo en la sección 3.3.4.2. Aquí se utilizan ambas metodologías y más adelante se comparan los resultados obtenidos.

El procedimiento general que se utiliza para ambos métodos consiste en definir una dirección predominante promediando vectorialmente el oleaje, ponderando en función de la energía de la ola (H^2) y la frecuencia de ocurrencia de la misma (f), esto es:

$$Dir = a\tan\left(\frac{\sum H_i^2 f_i sen(\theta_i)}{\sum H_i^2 f_i \cos(\theta_i)}\right)$$

A continuación se presentan los datos que se obtienen luego de propagar todas las olas con SoloREF. Estos datos son utilizados para el cálculo de la dirección predominante así se diferencie entre mar de fondo y tormenta o no. En las tablas se señalan aquellas olas que han sido consideradas como de tormenta en la sección 3.3.4.2 con gris claro.

Dirección original	Dirección final	H (m)	Frecuencia anual de ocurrencia	H2*f
30	30	0.25	3.7%	0.002
	30	0.75	2.3%	0.013
	30	1.25	2.5%	0.039
	45	1.39	1.1%	0.021
	65	1.53	0.7%	0.016
	70	1.74	0.2%	0.007
	45	2.46	0.2%	0.012
	45	2.77	0.1%	0.004
	55	2.78	0.0%	0.001
60	60	0.25	4.9%	0.003
	60	0.75	4.4%	0.025
	60	1.25	4.0%	0.063
	69	1.60	2.0%	0.052
	92	1.71	0.8%	0.023
	102	1.97	0.4%	0.014
	69	2.83	0.4%	0.030
	69	3.21	0.1%	0.009
	81	2.95	0.0%	0.000
90	90	0.25	2.1%	0.001
	90	0.75	2.3%	0.013
	90	1.25	2.8%	0.043
	95	1.57	1.2%	0.030
	105	1.76	1.1%	0.035
	108	1.99	0.4%	0.016
	95	2.98	0.3%	0.027
	95	3.61	0.0%	0.002
	100	3.67	0.0%	0.000
120	120	0.25	1.3%	0.001
	120	0.75	1.2%	0.006
	120	1.25	1.8%	0.029
	122	1.57	0.8%	0.021
	122	1.65	0.9%	0.024
	122	1.90	0.4%	0.016
	122	2.99	0.3%	0.023
	122	3.64	0.1%	0.010
	122	3.71	0.0%	0.005

Dirección original	Dirección final	H (m)	Frecuencia anual de ocurrencia	H2*f
150	150	0.25	1.9%	0.001
	150	0.75	1.9%	0.011
	150	1.25	2.7%	0.043
	150	1.57	1.7%	0.042
	146	1.75	1.2%	0.036
	145	2.31	0.5%	0.026
	150	3.02	0.5%	0.044
	150	3.67	0.2%	0.024
	148	3.62	0.0%	0.005
180	180	0.25	2.0%	0.001
	180	0.75	2.1%	0.012
	180	1.25	3.6%	0.056
	177	1.58	2.0%	0.050
	174	1.88	1.9%	0.065
	163	1.77	1.0%	0.030
	177	3.04	0.7%	0.068
	177	3.68	0.2%	0.029
	176	3.59	0.1%	0.007
210	210	0.25	1.3%	0.001
	210	0.75	1.7%	0.010
	210	1.25	2.5%	0.040
	210	1.64	1.5%	0.040
	191	1.52	1.2%	0.026
	202	1.34	0.6%	0.012
	210	2.45	0.6%	0.034
	210	2.71	0.3%	0.019
	201	2.35	0.1%	0.003

Tabla 3.18 -

Finalmente, la dirección predominante obtenida tomando todas las olas, sin distinguir entre aquellas de mar de fondo y aquellas de tormenta, es **135°**

Por otro lado, al utilizar tan solo aquellas olas que han sido definidas como mar de fondo en la sección 3.3.4.2, se obtiene que la dirección predominante del oleaje es **128°**:

Elección de la dirección predominante para utilizar con el método

Primero que nada se debe aclarar que la aplicación del método de la parábola con cualquiera de las tres direcciones predominantes obtenidas (140°, 135° y 128°) da resultados cualitativamente similares. Ya que este método no permite sacar conclusiones cuantitativas y que el objetivo general de la aplicación del mismo es confirmar la hipótesis de que la bahía no se encuentra en equilibrio estático, es indiferente la utilización de cualquiera de las direcciones obtenidas. Sin embargo, dado que existen elementos que permiten inclinarse a la utilización de una de las direcciones obtenidas, se expondrán los mismos y tan solo se presentarán los resultados obtenidos con la dirección elegida, teniendo

en cuenta que, como ya se ha dicho, los resultados obtenidos son cualitativamente similares con las tres direcciones.

Resulta muy significativo el hecho de que la dirección predominante obtenida a partir de la forma de la playa y la obtenida utilizando todo el oleaje sean tan similares (140° y 135° respectivamente). Sin bien la dirección obtenida a partir de aquellas olas definidas como mar de fondo no es significativamente distinta, ésta se aleja un poco de la tendencia marcada por las otras dos direcciones. Una posible interpretación de estos resultados es que la forma en que se define el mar de fondo en la sección 3.3.4.2 no se ajuste en un 100% a la realidad (lo cual es altamente probable dado que en los datos originales no se tiene ninguna información respecto al origen del oleaje), y que por lo tanto se estén dejando fuera del conjunto de olas definidas como mar de fondo a algunas de importancia en la configuración de la forma de la bahía. Por otro lado en la costa de La Pedrera no existe ninguna evidencia de cambios en la línea de costa, con lo cual se vuelve más fuerte la hipótesis de que la dirección predominante del oleaje debe ser muy cercana a los 140°.

Por lo antes dicho es que se opta por considerar como dirección predominante para aplicar el método de la parábola 140°.

3.6.4.2. Definición de los puntos duros y de los parámetros

El punto duro de aguas abajo se ha sido definido al comienzo de esta sección. Ahora, a partir de la dirección predominante, se define el punto duro de aguas arriba o punto de difracción. Una vez definido dicho punto se traza la línea de control y por lo tanto se obtiene R_0. Luego se calcula el ángulo β existente entre la línea de control trazada y el tren de olas incidente.

El punto de difracción encontrado para la bahía en estudio es la punta de la escollera del puerto de La Paloma. A partir de ello la línea de control tiene una longitud aproximada R_0=6300m y el ángulo entre dicha línea y el tren de olas predominante es β=30º. A partir de esto los coeficientes C_0, C_1 y C_2 valen 0.046, 1.136 y -0.186 respectivamente.

Dado que el punto de difracción actual es la punta de la escollera resulta interesante intentar conocer cual era el perfil de equilibrio de la bahía antes de la construcción de la escollera. Con este fin es que se define un nuevo punto de difracción considerando la situación previa a la construcción. Dicho punto duro está dado por la isla (hoy día unida a la costa) en la cual comienza la escollera. En este caso los parámetros del modelo son R_0=7000m y β=34º. Los coeficientes C_0, C_1 y C_2 valen 0.034, 1.199 y -0.237 respectivamente.

A continuación se presentan dos figuras. La primera de ellas muestra los parámetros R_0 y β en la bahía para las condiciones actuales y pasadas., mientras que en la segunda se muestra el resultado de aplicar el método de la parábola para ambos casos.

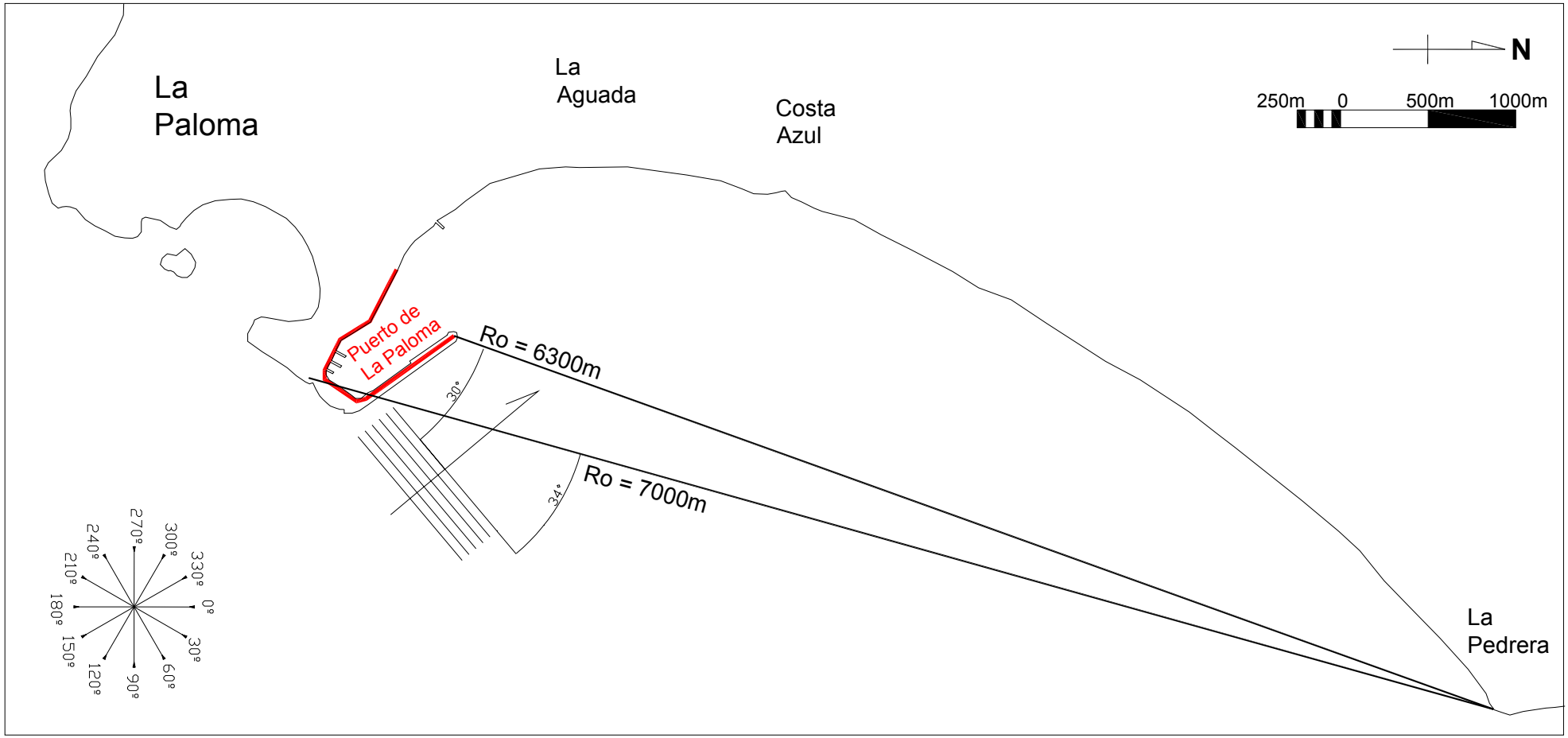


Figura 3.17 – Líneas de control y oleaje incidente utilizados para calcular los arcos de equilibrio estático

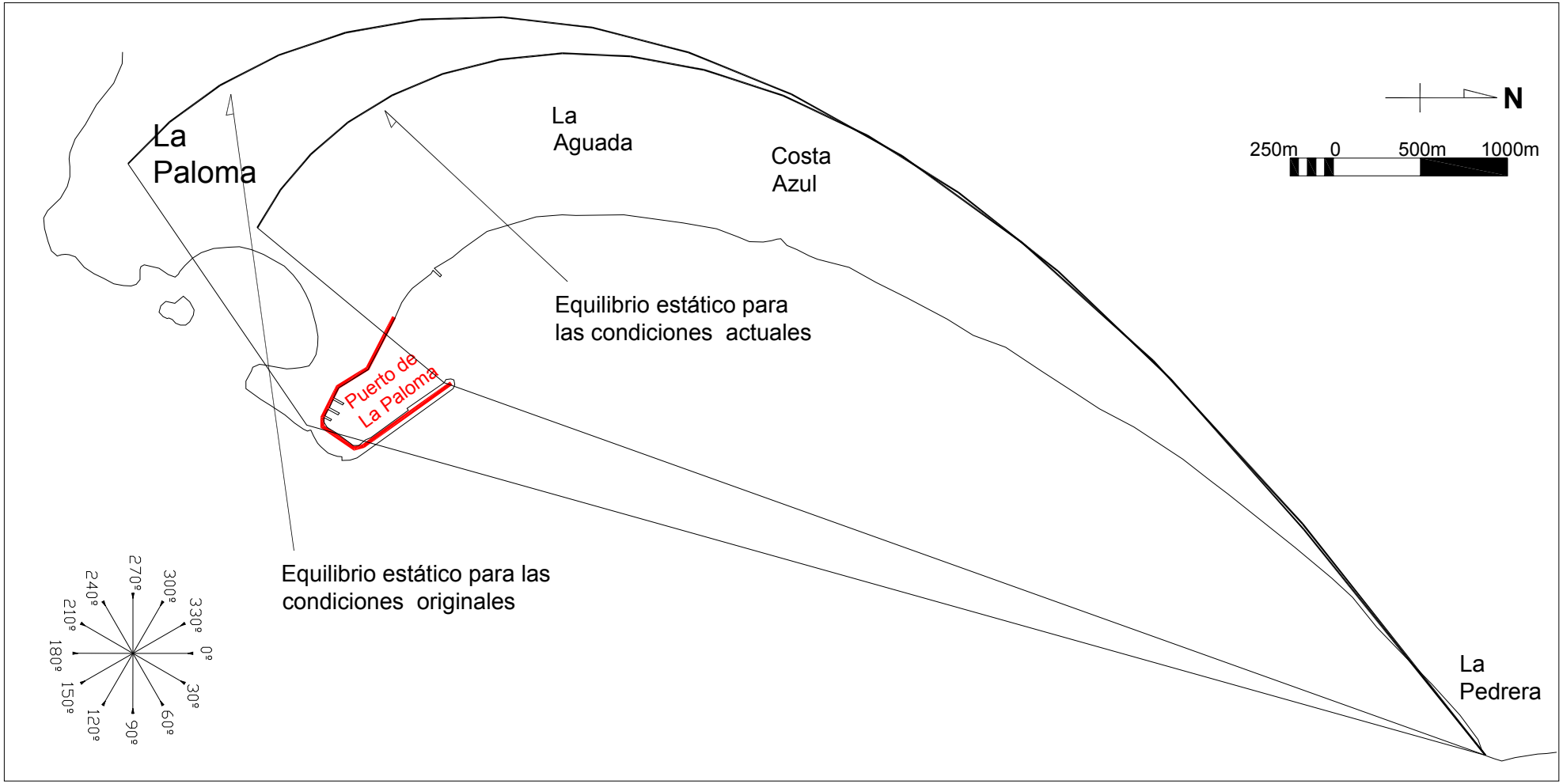


Figura 3.18 – Arcos de equilibrio estable anterior y posterior a la construcción de la escollera

3.6.5. Conclusiones derivadas de los resultados obtenidos

La primera conclusión que se desprende del análisis de los resultados obtenidos es que la bahía se encuentra considerablemente alejada del equilibrio estático, tanto si se considera la línea de equilibrio estático definida para las condiciones actuales como si se considera aquella definida para las condiciones previas a la construcción de la escollera.

Si se compara la línea de costa existente con la línea de equilibrio estático obtenida para las condiciones actuales se observa que el apartamiento de la línea de equilibrio estático se incrementa a medida que se avanza desde La Pedrera hasta La Paloma. El hecho de que exista un apartamiento de la línea de equilibrio estático tiene dos interpretaciones posibles:

a) Que la bahía se encuentra en equilibrio dinámico
b) Que la bahía se encuentra en retroceso

Si ahora se comparan las dos líneas de equilibrio obtenidas llama la atención el hecho de que la línea de equilibrio estático para las condiciones actuales presente un menor apartamiento de la línea de costa que la línea de equilibrio estático obtenida para las condiciones previas a la construcción de la escollera.

El hecho de que la bahía se encuentre tan alejada de la línea de equilibrio estático obtenida para las condiciones originales deja dos opciones posibles: a) que originalmente la bahía se encontrase en equilibrio dinámico y b) que la misma nunca haya estado en equilibrio dinámico y estuviese en retroceso. Es posible pensar que originalmente la bahía se encontrase en equilibrio dinámico ya que antes de que se forestaran los médanos y se expandiera el balneario existía una gran cantidad de arena disponible para alimentar la playa. Se trabaja entonces bajo la hipótesis de que originalmente la bahía se encontraba en equilibrio dinámico.

El equilibrio dinámico es muy sensible a las alteraciones en los flujos de arena, por lo tanto es posible que el deterioro en las playas de La Aguada esté debido fundamentalmente a las alteraciones generadas en los flujos de arena, no solo por la construcción de la escollera y la unión de la isla grande con la costa para hacer el puerto, si no también por la forestación y por las construcciones duras llevadas a cabo en la zona de medanos. Si bien la construcción de la escollera logró un acercamiento entre la línea de costa y la línea de equilibrio estático, sigue existiendo una gran diferencia entre ambas, con lo cual sólo es posible que la bahía mantenga su forma si se alcanza un nuevo equilibrio dinámico.

Resumiendo, se concluye que la bahía nunca ha estado en situación de equilibrio estático y que es altamente probable que se encontrase en equilibrio dinámico. Hoy día, dadas las afectaciones antrópicas sobre los flujos de arena, es altamente probable que dicho equilibrio dinámico ya no sea posible y que exista un retroceso hacia la línea de equilibrio estático o hacia un nuevo equilibrio dinámico no determinado aún.

3.6.6. Estudio de las fotos aéreas disponibles

En esta sección se pretende analizar las fotos aéreas disponibles a fin de intentar cuantificar el retroceso en la playa de La Aguada.

Se dispone de fotos aéreas de la zona del puerto y de La Aguada tomadas en las siguientes fechas:

- 13/05/1977 Escala 1:20000
- 23/08/1994 Escala 1:10000
- 20/01/2000 Escala 1:20000

Una primera dificultad que se plantea es la carencia de datos de marea para estas fechas ya que, por pura coincidencia, en aquellas fechas en que se tomaron las fotografías el mareógrafo del puerto de La Paloma se encontraba fuera de servicio. Esto imposibilita totalmente comparar la línea de costa en las distintas fechas ya que variaciones normales de la marea producen cambios en la línea de costa del orden de magnitud del retroceso que se intenta cuantificar. A modo de ejemplo, para ver la gran influencia de las mareas en el análisis de las fotos aéreas, se plantea el siguiente cálculo: dado que la playa analizada tiene una pendiente aproximada de 3%, si se considera una altura de marea de 50cm por encima del nivel normal, entonces la línea de costa está aproximadamente 17m por detrás de su posición media (posición con marea media).

Se plantea ahora como posibilidad el estudio de la línea hasta la que crece la vegetación. Esta línea es un buen indicador del nivel hasta el cual puede llegar el agua.

Se decide comparar la foto aérea más reciente de la que se dispone (año 2000) con la más antigua (año 1977). Para superponer ambas fotos se utiliza como referencia el camino que corre paralelo a la costa, uniendo La Paloma con La Aguada. La zona a comparar corresponde a la playa de La Aguada. En la siguiente figura se presentan los perfiles obtenidos al comparar ambas fotos aéreas.

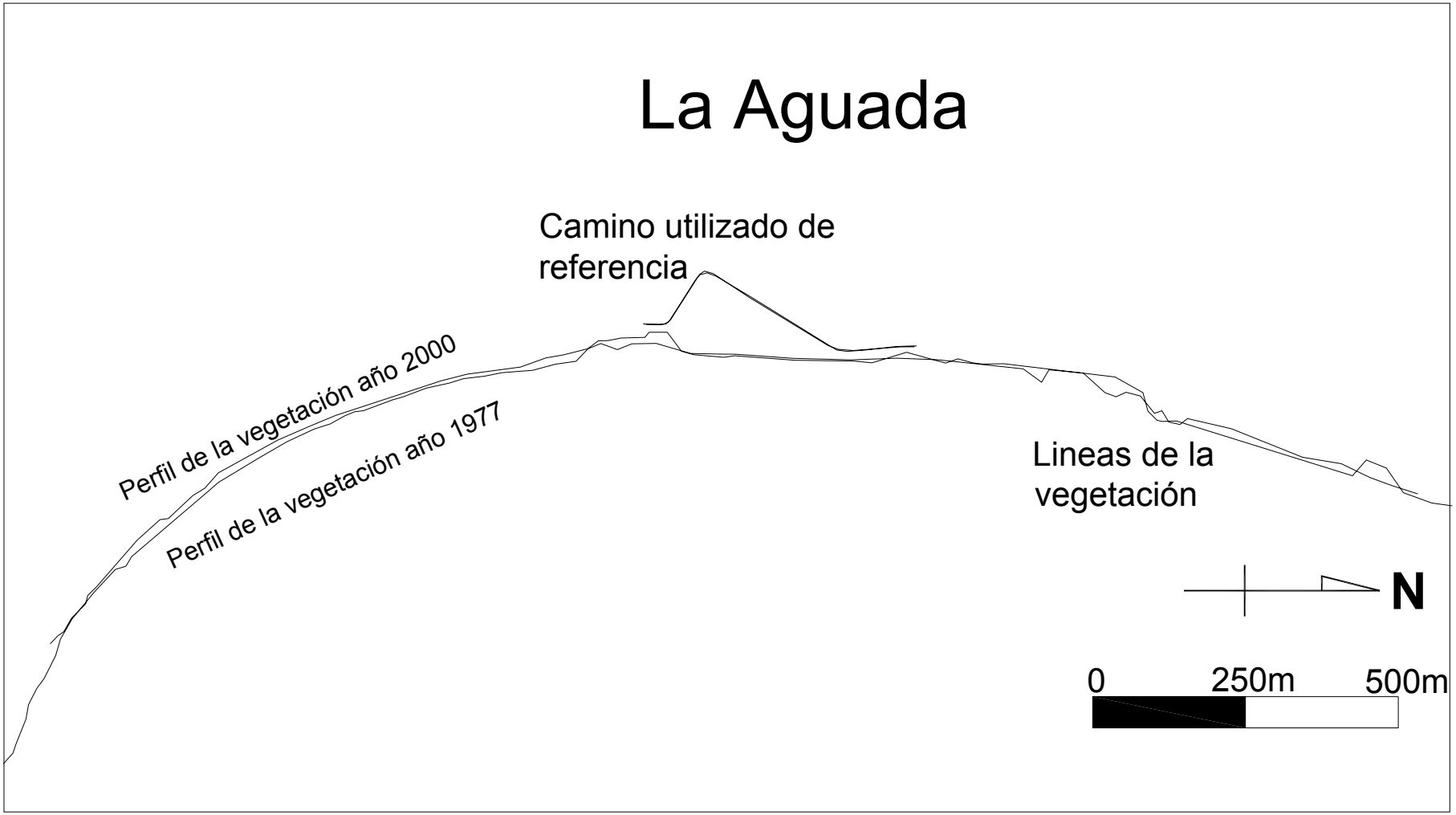


Figura 3.19 – Análisis de las fotos aéreas

El máximo retroceso observado de la línea de vegetación es del orden de los 10m. Esto evidencia un retroceso de la línea de costa, sin embargo la escala de las fotos aéreas hace que no se pueda asegurar con exactitud la magnitud de dicho retroceso y que se deba trabajar de aquí en más con el orden del mismo.

Si bien el orden del retroceso de la línea de vegetación es menor comparado con las dimensiones de la bahía (aproximadamente 10m de retroceso en 24 años) no resulta para nada insignificante a una escala humana, en donde estos 10m de retroceso implican el deterioro o la puesta en riesgo de las propiedades que se encuentran inmediatamente sobre la costa y la pérdida de arena seca en la playa (no es posible cuantificar esto a partir de las fotos aéreas).

El retroceso observado en las fotos aéreas, si bien no resulta ser de gran magnitud, es coherente con lo dicho en la sección 3.6.5, en la cual se concluye que el equilibrio dinámico de la bahía ha sido alterado antrópicamente al forestar la zona de medanos, al edificar gran cantidad de casas y hoteles en la zona de médanos, al construir caminos de asfalto también en zona de médanos y posiblemente también al unir la isla grande con la costa.

3.6.7. Estudio de la influencia de los dragados en el retroceso de la costa

Todo a lo largo de la historia del puerto de La Paloma, desde su construcción hasta hoy, se han sucedido varios dragados del mismo, para los cuales se lleva un registro más o menos detallado (dependiendo de lo reciente del dragado) del volumen extraído.

Si bien los métodos utilizados para los dragados han variado a lo largo del tiempo, una característica común a todos ellos es que la arena dragada es sacada del sistema (considerando como sistema a la bahía).

En esta sección se pretende evaluar si la magnitud de los dragados es tal que pueda afectar la línea de costa o si por el contrario es totalmente despreciable en comparación a los volúmenes de arena involucrados en el retroceso de la playa.

El procedimiento general aplicado para llevar a cabo la evaluación consiste en estimar la arena involucrada en un retroceso de 10m de la línea de costa y comparar el resultado obtenido con el volumen medio dragado históricamente.

Para poder estimar el volumen de arena involucrado en un retroceso de 10m se define un perfil de playa que, para simplificar el análisis, se considera uniforme en los primeros 3000m del arco de playa comenzando desde el puerto (esto es desde el puerto hasta el final de Costa Azul, tomado éste como límite arbitrario de la zona en retroceso). A su vez se considera que el perfil de la playa es el mismo antes y después del retroceso.

3.6.7.1. Perfil de la playa

Se ha encontrado que el perfil de la playa está dado, en forma general, por la ecuación parabólica:

$$h = Ay^{2/3}$$

En donde *h* denota la profundidad e *y* es la distancia aguas adentro desde la costa (CEM). El parámetro A está relacionado con la granulometría de la arena y puede obtenerse a partir del siguiente ábaco:

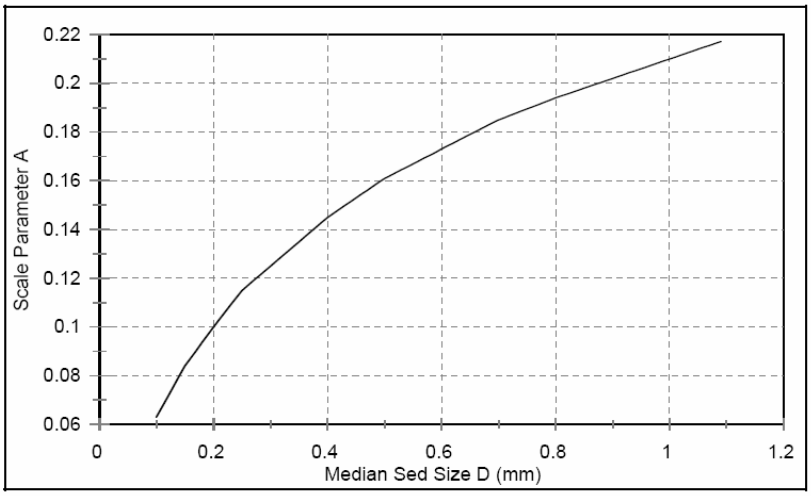


Figura 3.20 – Ábaco del que se obtiene el parámetro A (CEM)

Para el caso particular de la playa de La Aguada, para la cual se tiene un tamaño medio del grano de arena de 0.13mm, se obtiene para el parámetro A un valor aproximado de 0.07.

Si por otro lado se utilizan los datos obtenidos en campo, según los cuales para una distancia de la costa de aproximadamente 35m se tiene una pendiente de 1.5% (dh/dy=0.015 para y=35m), entonces el valor de A obtenido a partir de estos datos es:

$$\frac{dh}{dy} = \frac{2}{3}\frac{A}{y^{1/3}} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{3}{2}\frac{dh}{dy}y^{1/3} \quad \Rightarrow \quad A = 0.074$$

Lo próximo del valor obtenido del ábaco con el valor obtenido de los datos medidos en campo valida, de forma poco rigurosa, la aplicación del modelo al perfil de la playa de La Aguada.

Se utiliza para los cálculos subsiguientes el valor A=0.07 obtenido del ábaco.

Un parámetro de fundamental importancia en este análisis es la profundidad de cierre. Para profundidades mayores a la profundidad de cierre se considera nulo el transporte transversal a la costa. A su vez, dada la magnitud de la profundidad de cierre, también se puede considerar nulo el transporte litoral en dicha zona. De esto se desprende que el perfil de la playa se mantiene relativamente constante para profundidades mayores a la de cierre dado que allí no actúan las dos principales formas de transporte de sedimento.

La profundidad de cierre se define como (ver CEM o Dean y Dalrymple 2002):

$$h_c = 1.57\left(H_{med} + 5.6\sigma_H\right)$$

En donde H_{med} y σ_H son la media del oleaje registrado y la desviación estándar de mismo, que, para este caso en particular valen 1.25m y 0.95m respectivamente, como se presenta en la sección 2.2.2.

A partir de estos valores se obtiene una profundidad de cierre $h_c \approx 10$m.

La distancia desde la costa, según la formulación parabólica, a la cual se tiene esta profundidad es aproximadamente y=1700m. Esto representa una nueva evidencia de que el perfil parabólico se ajusta adecuadamente a la costa ya que la línea de isoprofundidad 10m en la batimetría se encuentra a aproximadamente 1400m de la costa.

3.6.7.2. Volumen de arena involucrado en el retroceso

Aquí se evalúa el volumen de arena que debe salir del sistema para que la línea de costa retroceda 10m. La figura siguiente muestra el perfil de la costa antes y después del retroceso.

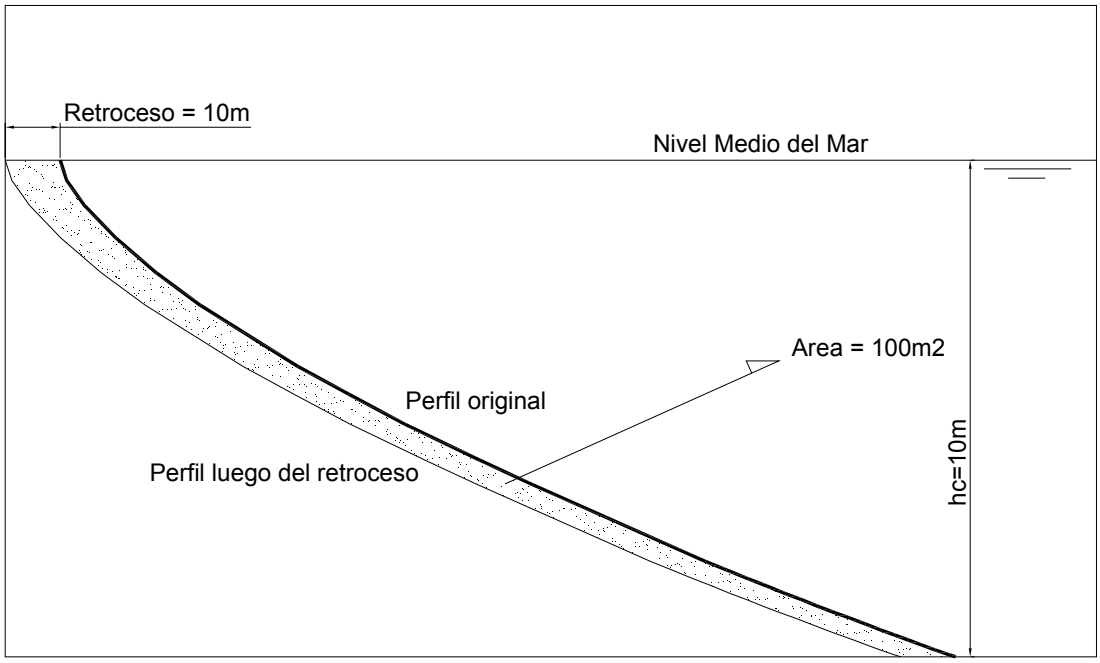


Figura 3.21 – Esquema del área involucrada en un retroceso de 10m de costa

El área involucrada en el retroceso es 100m^2, lo cual, multiplicado por los 3000m de costa, implica un volumen de arena igual a 300.000m^3.

3.6.7.3. Conclusiones a partir de los resultados obtenidos

Desde el año 1976 hasta el 2004 (26 años) se han dragado del puerto de La Paloma un total de 1.630.000m^3 de arena, los cuales han sido sacados del sistema bahía en su totalidad; esto implica por lo tanto una media de 86.000m^3 anuales de arena que son sacados del sistema. Si se compara este valor con el volumen de arena involucrado en un retroceso de 10m se encuentra que los volúmenes dragados no son para nada despreciable en el balance general de la bahía; solo a modo de ejemplo, si se supone que el sistema no pierde arena de otra forma que no sea mediante los dragados y que tampoco recibe arena, entonces mediante los dragados esporádicos realizados hasta la fecha se estaría generando un retroceso de 10m cada aproximadamente 3 o 4 años.

3.6.8. Conclusiones finales sección 3.6

A la luz de los tres análisis ya presentados (método de la parábola, análisis de las fotos aéreas y estudio de la influencia de los dragados en los retrocesos), y con las conclusiones que se desprenden de cada uno de ellos sobre la mesa, surge la necesidad de formular conclusiones generales que compatibilicen todos los resultados obtenidos.

Del análisis de los perfiles de equilibrio estático se concluye que la bahía en estudio no solo no se encuentra en equilibrio estático si no que nunca ha estado en equilibrio estático. Resulta novedoso el hecho de que la construcción de la escollera no solo no aleja a la bahía del equilibrio estático si no que la acerca al mismo. Por lo tanto el retroceso verificado

mediante el análisis de las fotos aéreas no se debe a que se halla aumentado la diferencia entre el equilibrio estático y la línea de costa actual, si no que aquel está generado por una alteración en el balance de los flujos de arena entrantes y salientes del sistema. En estas alteraciones sí parece tener influencia la construcción del puerto, principalmente la unión de la isla grande con la costa, la que impide cualquier potencial ingreso de arena desde el sur. Sin embargo es de esperar que una de las principales afectaciones a los flujos de arena esté dada por la forestación de la zona de medanos y por las numerosas edificaciones llevadas a cabo en dicha zona a medida que se expandía el balneario. Adicionalmente los dragados pueden ser vistos como flujo saliente del sistema. Se ha mostrado en la sección 3.6.7 que este flujo no es para nada despreciable en el balance general y que puede estar jugando un papel importante en el retroceso de la línea de costa.

3.7. Conclusiones generales del capítulo 3

A lo largo del capítulo se estudia con cierto detalle la dinámica de los flujos de arena en la bahía que va desde el puerto de La Paloma hasta La Pedrera. Esto permite entender cómo llega la arena al interior del puerto y el porqué de que la misma no salga naturalmente. Adicionalmente este estudio de la dinámica de los flujos de arena permite entender los efectos que han tenido y que siguen teniendo algunas acciones humanas sobre la bahía.

Las conclusiones centrales de ente capítulo se pueden encontrar desarrolladas con mayor detalle en las secciones 3.5.5 y 3.6.8.

A continuación se enumeran las principales conclusiones a las que se llega en este capítulo y que son centrales a la hora de diseñar una solución para el problema del ingreso de arena al puerto:

I. El ingreso de arena al puerto está generado mayoritariamente por el transporte litoral en dirección sur; una vez ingresada al puerto la arena ya no puede ser sacada naturalmente dado que dentro del puerto no existe transporte litoral.

II. El transporte litoral en dirección sur es generado por olas cuya dirección original es 30º y 60º y por lo tanto ocurre a lo sumo 100 días al año.

III. El volumen de arena que entra al puerto anualmente es aproximadamente 130.000m^3. Pueden existir variaciones significativas de este valor en caso de presentarse tormentas de importancia.

Las siguientes conclusiones refieren a la dinámica del arco de playa. Las mismas son de carácter tentativo y su verificación requiere de análisis más profundos de la dinámica general de las playas de La Paloma; análisis no pertinente para el diseño de una estructura que evite el ingreso de arena al puerto y que por lo tanto no se lleva a cabo en este proyecto.

IV. La bahía, cuyo estado original *es posible* que haya sido el equilibrio dinámico, hoy día se encuentra en retroceso debido, *probablemente*, a alteraciones en los flujos de arena. Dicho retroceso no es fácilmente cuantificable pero a partir de fotos aéreas *se estima* que su escala es del orden de los 10m.

V. Las principales alteraciones en los flujos de arena son de origen antrópico, siendo la forestación y las construcciones en los médanos las alteraciones que *se piensa* tienen mayor efecto sobre dichos flujos.

VI. Los volúmenes dragados y sacados del sistema bahía son de tal magnitud que tienen la capacidad de afectar significativamente la línea de costa, acentuando de este modo el retroceso de la bahía.

Capítulo 4 – Diseño en planta del espigón y cambio en la línea de costa

4.1. Introducción

Hasta este momento se ha logrado hacer un diagnóstico de las causas del aterramiento que se produce en el puerto de La Paloma. Hasta el día de hoy este problema se ha solucionado mediante dragados esporádicos, sin embargo esta solución es costosa y poco práctica. Resulta poco práctica porque el dragado se realiza una vez que el puerto ya está aterrado y por lo tanto el muelle 3 se encuentra totalmente inutilizable. Una alternativa para mantener el muelle 3 siempre en funcionamiento es dragar de forma continua, lo cual resulta poco práctico e implica dedicar un espacio del puerto para las dragas los 365 días del año.

Como alternativa a los dragados del puerto se plantea la construcción de un espigón que detenga el ingreso de la arena al puerto.

Al evitar el ingreso de arena al puerto se asegura que el muelle 3 pueda ser utilizado de forma ininterrumpida. Es esperable que al detener la arena que actualmente ingresa al puerto se produzca un avance de la línea de costa en el lado norte del espigón. En este caso la arena ingresaría al puerto (con una tasa de ingreso menor a la actual), generando nuevamente los inconvenientes descritos en secciones anteriores. La solución a este problema es prever dragados periódicos que mantengan al espigón en las condiciones de trabajo para las cuales fue dimensionado.

Algunas de las ventajas que trae aparejada la construcción del espigón frente al dragado continuo son:

- El muelle 3 puede utilizarse en su totalidad sin necesidad de dragar de forma continua, no necesitando siquiera reservar un amarre para la draga.
- La arena se acumula fuera del puerto y por lo tanto los eventuales dragados se llevan a cabo fuera del puerto sin entorpecer las tareas propias del mismo.
- El probable incremento en el ancho de la playa en una zona cercana al espigón debido a la retención de arena que este genera.
- La acumulación de arena fuera del puerto (fuera de la zona donde la escollera principal de cierre del puerto hace sombra) implica que esta queda disponible para ser transportada nuevamente en dirección norte.

4.2. Objetivo

En este capítulo se hace un prediseño del espigón, esto implica definir la localización del mismo en planta y su longitud. Adicionalmente se estima la forma de la costa una vez construido el espigón y el tiempo de llenado del mismo (este último es un parámetro fundamental para evaluar la periodicidad de los dragados).

Es central a la hora de decidir la localización y la longitud del espigón asegurarse de que éste evitará el ingreso de arena al puerto. Para ello es fundamental conocer cual será el comportamiento de la costa y de los sedimentos una vez construido el mismo. A fin de conocer dichos comportamientos y de poder hacer el prediseño del espigón de forma adecuada se decide la utilización de dos modelos analíticos que permiten evaluar el comportamiento general de la costa en la zona cercana al puerto. La utilización de estos modelos trae aparejada la verificación de los mismos, lo cual se hace verificando que los modelos a utilizar son coherentes con el comportamiento actual de la costa. En particular se verifica que el transporte de sedimentos en dirección al puerto, resultante de la aplicación de los modelos, es del mismo orden que el caudal de arena que efectivamente entra al puerto.

4.3. Modelos a ser aplicados

El modelo que se usa en estos casos para evaluar la evolución de la línea de costa a lo largo del tiempo es el “modelo de una línea”. El mismo, desarrollado por Pelnard y Consdère en 1956, describe el comportamiento de la línea de costa suponiendo que el perfil de playa es un perfil de equilibrio y que el mismo se mantiene constante a lo largo del tiempo. Avances o retrocesos de la línea de costa se producen manteniendo dicho perfil de equilibrio, definido desde la cota superior de la berma hasta la profundidad de cierre.

El modelo de Pernald y Considère puede ser resuelto tanto numéricamente como analíticamente. Según Dean y Dalrymple la herramienta informática de uso habitual para resolver las ecuaciones del modelo es el programa Genesis, sin embargo, al no disponer del mismo para la realización de este proyecto, y dado que la implementación de una solución numérica a dichas ecuaciones excede ampliamente los objetivos del mismo, en este capítulo se aplicarán distintas soluciones analíticas conocidas que permiten, bajo ciertas hipótesis simplificatorias, conocer de forma aproximada la evolución esperable de la línea de costa.

A continuación se presenta de forma resumida el modelo de Pernald y Considère y cómo se llega al mismo a partir de leyes ya conocidas (para más información a este respecto ver Dean & Dalrymple 2002). Más adelante se presentan las dos soluciones analíticas aplicadas y los resultados obtenidos. Dichas soluciones son denominadas aquí “modelo de ola única” y “modelo de ola no estacionaria”.

4.3.1. Modelo de Pernald y Considère

Este modelo fue desarrollado originalmente en 1956 para examinar el comportamiento de la línea de costa frente a la construcción de espigones. Desde entonces el mismo ha sido aplicado en diversidad de problemas costeros que involucran la evolución de la línea de costa a lo largo de varios años.

El modelo parte de dos ecuaciones básicas:

- La ecuación de transporte de sedimentos del método del flujo de energía, presentada en la sección 3.4.3.2.
- La ecuación de la conservación de la masa

En principio se definen los ejes de coordenadas cartesianas 0x, 0y de forma tal que 0x está orientado de forma aproximadamente paralela a la costa y que 0y está orientado hacia aguas adentro. La posición de la línea de costa esta dada entonces por la ecuación:

$$y = y(x,t)$$

Se define **n** como la normal a la costa en cada punto y **j** como el versor orientado en la dirección 0y, por lo tanto el ángulo que forma la línea de costa con el eje 0y es:

$$\gamma = a\cos(n \cdot j)$$

El transporte de sedimentos en cada sección transversal a la costa está dado por la siguiente ecuación (ver sección 3.4.3.2):

$$Q = \frac{K\rho H_b^{5/2}\sqrt{g/\kappa}}{16(\rho_S - \rho)(1-p)} sen(2(\delta_b - \gamma)) = C_q sen(2(\delta_b - \gamma))$$

En donde las variables K, ρ, H_b, κ,ρ_s y p se definen en la sección 3.4.3.2; δ_b es el ángulo de la ola rompiente con respecto al eje 0y y γ es el ángulo que forma la línea de costa con el eje 0y.

Se hace ahora un balance de arena en un volumen de control definido entre dos secciones espaciadas entre sí Δx (ver **figura 4.1**). Por la sección x entra un caudal de arena Q(x), mientras que por la sección x+Δx sale un caudal de arena Q(x+Δx). Para calcular el balance de arena se hacen las siguientes simplificaciones:

- Todas las secciones comprendidas entre x y x+Δx tienen el mismo perfil de playa en equilibrio, el cual se mantiene a lo largo del tiempo.
- La línea de costa entre x y x+ Δx tiene una única posición inicial y(t) independiente de x, y el avance (o retroceso) que se produzca con el tiempo también es independiente de x.
- El volumen de arena depositado (o extraído) del volumen de control se distribuye uniformemente en el perfil activo de la playa, resultando entonces la siguiente relación entre el cambio de posición de la línea de costa Δy, el volumen depositado (extraído) ΔV y la altura total del perfil activo d_c+d_B (donde d_c es la profundidad de cierre y d_B es la altura de la berma):

$$\Delta V = (d_c + d_B)\Delta y$$

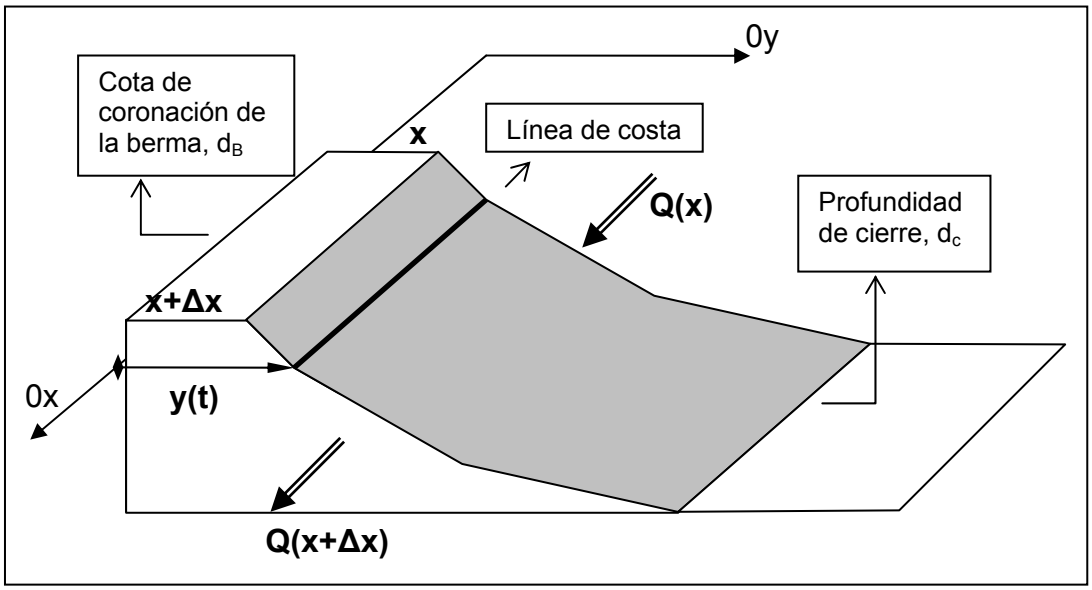


Figura 4.1 -

El balance de arena resulta entonces en:

$$\Delta t\left[Q(x)-Q(x+\Delta x)\right]=\left[y(t+\Delta t)-y(t)\right](d_c+d_B)\Delta x$$

Utilizando el desarrollo en serie de Taylor y tomando límite con Δx y Δy tendiendo a cero, se obtiene:

$$\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{1}{d_c+d_B}\frac{\partial Q}{\partial x}=0$$

Finalmente, sustituyendo Q por su expresión dada por el método del flujo de energía y transformando la ecuación resultante bajo la hipótesis de $\partial y/\partial x<<1$, se obtiene la siguiente ecuación de difusión, que es la versión final de la ecuación de Pelnard y Considère:

$$\frac{\partial y}{\partial t}=G\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

G es el coeficiente de difusión de la corriente litoral y sus unidades son m^2/s. G está dado por:

$$G=\frac{2C_q\cos(2\delta_b)}{d_c+d_B}$$

La ecuación de difusión, como toda ecuación diferencial, permite infinitas soluciones. Para determinar una solución única habrá que definir condiciones de borde y condiciones iniciales. Son justamente estas condiciones las que determinan cada problema particular y permiten alcanzar una solución única para la ecuación que, en definitiva, no es más que la posición de la línea de costa en cada instante de tiempo y(x,t).

4.3.2. Modelo de ola única.

El modelo de ola única simplifica enormemente las principales variables que tienen incidencia sobre el comportamiento de la línea de costa en las cercanías del espigón. Este modelo supone:

- Condición inicial de costa recta e infinita ($y(x,0)=y_0$ constante)

- Una única ola incidente, para la cual se conoce la dirección y la altura en la rompiente

- Condición en x=0 de no pasaje de arena, lo cual implica que la línea de costa contra el espigón sea paralela al tren de olas incidente, o sea $\partial y(0,t)/\partial x=-\tan(\delta b)$

- Condición en x infinito de no cambio en la línea de costa $y(x\rightarrow\infty,t)=y_0$. Esta última condición implica que en x infinito el caudal de arena que ingresa es constante a lo largo del tiempo.

Dadas estas condiciones existe solución analítica para la ecuación de difusión. Dicha solución está desarrollada con mayor detalle tanto en el CEM como en Dean & Dalrymple (2002).

Para tener en cuenta la longitud del espigón se define la solución y(x,t) a la ecuación de difusión como válida para t<tf, donde tf es el tiempo para el cual, en x=0, se alcanza y(0,tf)=Y, siendo Y la longitud del espigón.

En la siguiente figura se presenta una costa totalmente recta e infinita sobre la cual incide una única ola cuyo ángulo relativo a la costa, en la rompiente, es α_b. Allí se muestra esquemáticamente la evolución de la costa una vez construido el espigón.

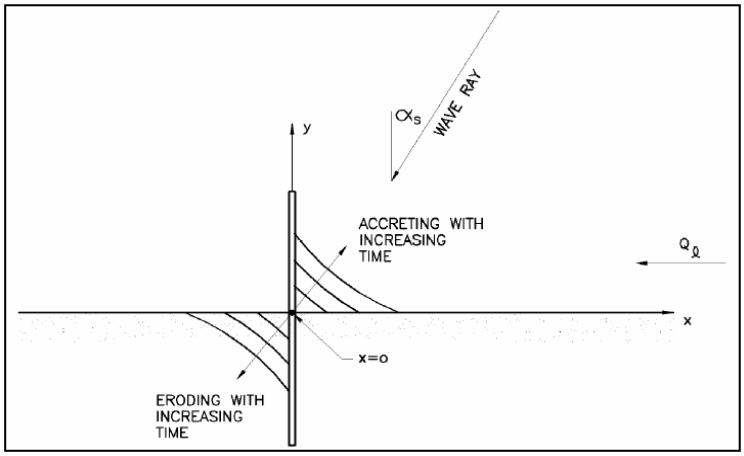


Figura 4.2 -

Algunos comentarios en cuanto a las condiciones de borde e inicial y a la aplicabilidad del modelo en el caso en estudio:

- Por como está planteado, el modelo determina la posición de la línea de costa cuando existe un único oleaje incidente, el cual es constante a lo largo del tiempo. Para poder aplicar este modelo se debe construir una única ola equivalente a partir del conjunto de olas incidentes y verificar que la misma describe, por ella sola, el comportamiento de la playa en la zona cercana al puerto. Esto se hace más adelante en esta sección.
- Dado que la condición inicial de la playa no es recta este modelo se aplicará tan solo a la zona cercana al puerto, la cual, como se verá, puede ser aproximada por una recta.

- La condición de playa infinita es violada a la hora de aplicar el modelo, sin embargo la configuración real de la línea de costa asegura un aporte de arena en dirección sur igual o mayor al que existiría con la costa recta.

Teniendo en cuenta lo dicho se considera que el modelo es aplicable al caso en estudio pero se deben tener prudencia al manejar los resultados, principalmente porque el modelo no tiene en cuanta otros oleajes incidentes en la zona cuyo efecto es el transporte de arena en dirección norte y por lo tanto el vaciado del espigón.

A continuación se presenta la solución analítica de la ecuación de difusión para las condiciones de borde e inicial presentadas. Se debe tener en cuanta que las líneas de costa aguas arriba y aguas abajo del espigón son totalmente simétricas.

$$y = 2\sqrt{\varepsilon t}\tan(\alpha_b)\left[\frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-\left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}}\right)^2} - \frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}}erfc\left(\frac{x}{2\sqrt{\varepsilon t}}\right)\right] \quad t < t_f$$

Aquí *erfc()* es la función error complementaria, α_b es el ángulo relativo a la costa de la ola predominante cuando esta rompe, *t* es el tiempo transcurrido desde la colocación del espigón, t_f es el tiempo que tarda el espigón en llenarse e Y es la longitud del espigón.

A continuación se presentan las fórmulas para calcular t_f y ε:

$$t_f = \frac{Y^2\pi}{4\varepsilon\tan(\alpha_b)}$$

$$\varepsilon = \frac{KH_b^2C_{gb}}{8}\left(\frac{\rho}{\rho_s-\rho}\right)\left(\frac{1}{1-n}\right)\left(\frac{1}{d_b+d_c}\right)$$

4.3.3. Modelo de ola no estacionaria

Este es un modelo desarrollado por D. E. Reeve y presentado en el Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering en Marzo-Abril del 2006.

Parte de la ecuación de difusión de Pelnard y Considère agregándole dos términos más que representan una posible fuente de arena:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \varepsilon\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha\varepsilon)$$

La solución analítica propuesta por Reeve presenta como gran ventaja a ser explotada en este estudio, la posibilidad de estudiar la evolución de la línea de costa, a partir de una condición inicial cualquiera, frente a un clima de oleaje incidente que no tiene por que estar representado por una única ola, si no que, por el contrario, puede estar compuesto por una sucesión (tan grande y variada como se desee) de olas de amplitud y dirección diferente. Otra ventaja de este modelo y que no será utilizada aquí es la posibilidad de introducir fuentes o sumideros de arena.

Reeve plantea la resolución de esta ecuación mediante transformadas de Fourier, permitiendo entonces hacer al parámetro ε dependiente del tiempo y posibilitando de esta forma la introducción de distintas olas como forzantes del cambio de la línea de costa.

Las condiciones de borde e inicial a utilizar en la solución son similares a las utilizadas en el método anterior. Esto se justifica por dos motivos:

- El utilizar la misma configuración inicial y la misma condición de borde en x infinito permite una mejor comparación de los resultados obtenidos con los distintos métodos
- El utilizar una misma condición inicial permite, como se verá más adelante, realizar una única verificación de la bondad de los métodos a la hora de modelar la situación actual.

A continuación se presenta en forma esquemática la solución analítica de la ecuación, para más detalles ver D.E. Reeve (2006).

Parametrizando los términos de fuente de arena se encuentra:

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} = \varepsilon(t)\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + r(t)y(x,t) + s(x,t)$$

Para la condición inicial se toma una forma de playa arbitraria, representada por una función g(x) de manera que:

$$y(x,0) = g(x) \qquad x > 0$$

La condición de borde en x=0 (condición en el espigón) es caudal cero; esto se logra imponiendo que la línea de costa en dicho punto sea paralela al tren de olas incidente en todo momento:

$$\frac{\partial y(0,t)}{\partial x} = h(t) \qquad t > 0$$

$$h(t) \equiv \tan(\alpha_b)$$

Para la condición de borde final se requiere que:

$$y \to 0 \quad con \quad x \to \infty \quad para\ t > 0$$

De esta manera, la solución y(x,t) de esta ecuación diferencial se puede representar como:

$$y(x,t) = I_1 + I_2 + I_3$$

Donde:

$$I_1 = \frac{1}{2}\left\{\pi\int_0^t \varepsilon(u)du\right\}^{-1/2} \times \exp\left(\int_0^t r(u)du\right) \times \int_0^\infty g(\lambda)\left\{\exp\left(-\frac{(x+\lambda)^2}{4\int_0^t \varepsilon(u)du}\right) + \exp\left(-\frac{(x-\lambda)^2}{4\int_0^t \varepsilon(u)du}\right)\right\}d\lambda$$

$$I_2 = -\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^t \left(\int_w^t \varepsilon(u)du\right)^{-1/2} \times \exp\left(-\left(\frac{x^2}{4\int_w^t \varepsilon(u)du} - \int_w^t r(u)du\right)\right)\varepsilon(w)h(w)dw$$

$$I_3 = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \left(\int_0^t \exp\left(-\int_w^t \left[v^2\varepsilon(u) - r(u)\right]du\right)s(v,w)dw\right)\cos(vx)dv$$

La complejidad de esta solución se salva integrando numéricamente.

4.4. Elección de los parámetros de entrada para los modelos

4.4.1. Costa

El modelo de ola única supone la costa como recta e infinita. Para acercarse a dicha hipótesis se limitará el análisis a la zona de la playa de mayor interés, que es aquella en la cual se maneja la posibilidad de construir el espigón. Dicha zona, como se muestra en la siguiente figura, puede aproximarse por una línea recta:

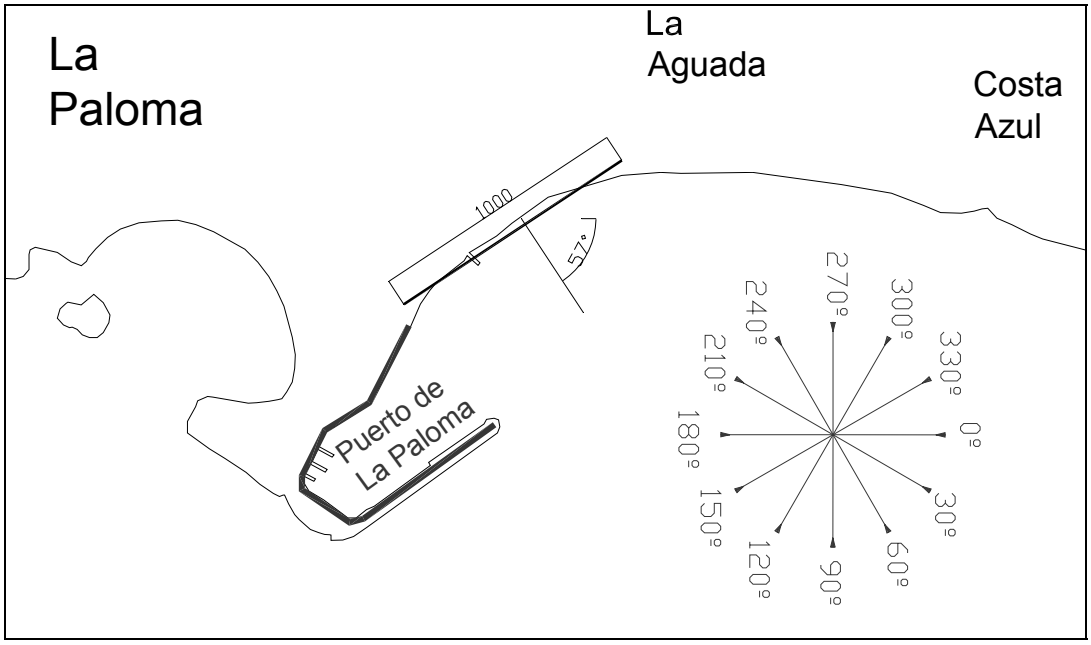


Figura 4.3 -

En lo que respecta al modelo de ola no estacionaria, si bien este permite trabajar con una costa no recta, se decide trabajar de todas maneras con la misma costa recta y así tener más puntos de comparación con el modelo de ola única.

4.4.2. Oleaje

4.4.2.1. Modelo de ola única

En lo que al oleaje respecta, el modelo de ola única impone la necesidad de trabajar con una única ola incidente.

A partir de las propagaciones originales se concluye que las olas que generan transporte hacia el puerto son aquellas cuyas direcciones originales están comprendidas entre los 15º y los 75º. En los datos disponibles, todas las olas con dirección entre los 15º y 45º están representadas por la dirección 30º, mientras que todas las olas con dirección entre los 45º y 75º están representadas por la dirección 60º. A partir de esto se plantea la siguiente metodología para obtener la ola única a utilizar con el modelo:

a) Con los resultados de las primeras propagaciones realizadas con SoloREF se le asigna a cada dirección original (30º y 60º) un vector. La dirección del vector correspondiente a cada dirección de oleaje está dada por la media (ponderada por

energía, H^2) de la dirección que tienen las olas luego de ser propagadas con SoloREF. El módulo de los vectores correspondientes a 30 y 60º es proporcional a la suma de la energía que transportan las olas multiplicado por la frecuencia de ocurrencia de cada ola.

b) Luego, la dirección predominante de la ola está dada por la suma vectorial de los dos vectores resultantes, y resulta ser 60º.

c) La altura de la ola única se calcula de forma tal que conserve la energía total:

$$H_{\mathrm{Re}\,sul\,\tan te} = \sqrt{\frac{\sum H_i^2 f_i}{\sum f_i}} = 1.1m$$

d) De forma similar se calcula el período de la ola única:

$$T_{\mathrm{Re}\,sul\,\tan te} = \frac{\sum H_i^2 f_i T_i}{\sum H_i^2 f_i} = 7.8s$$

e) Una vez definida la ola predominante incidente, ésta se propaga hasta la costa con el RefDif de modo de conocer la altura y la dirección de la ola en la rompiente.

Una vez propagada la ola, ésta llega a la costa con una dirección aproximada de 53º, lo que implica una dirección relativa a la costa de **4º**. La altura de la ola en la rompiente es aproximadamente **1.14m.** Esta ola tiene una frecuencia de ocurrencia de 100 días por año, que es la suma de las frecuencias de ocurrencia de todos los oleajes provenientes de las direcciones comprendidas entre 15º y 75º. Para este modelo se toma el resto del año (265 días por año) como calma absoluta.

4.4.2.2. Modelo de ola no estacionaria

Para el modelo de ola no estacionaria se decide trabajar con tres olas diferentes, cada una con su frecuencia de ocurrencia.

La primera de las olas elegidas es la ola con que se trabaja en el modelo de ola única, o sea, el promedio de las olas con dirección original entre 15º y 75º.

Las otras dos olas con que se trabaja en este modelo son el promedio de las olas con dirección original entre 75º y 105º (representadas en los datos disponibles por la dirección 90º) y el promedio del las olas con dirección original entre 105º y 135º (representadas en los datos disponibles por la dirección 120º). La forma de calcular estos promedios, tanto en altura de ola como en dirección, es idéntica a la utilizada en el modelo de ola única.

A partir de esto, en la siguiente tabla se pueden apreciar, para cada ola definida, el período, altura y dirección de la misma antes de ser propagada con RefDif y altura y dirección en la costa luego de ser propagada con RefDif.

	Dirección original		
	15° - 75°	75° - 105°	105° - 135°
Período (s)	7,8	8,8	9,1
Frecuencia (días/año)	100	37	24
Altura inicial (m)	1,10	1,28	1,41
Dirección inicial	60°	97°	121°
Altura final (m)	1,14	1,20	0,70
Dirección final	53°	61°	70°
Direcc. respecto a la costa	4°	-4°	-13°

Tabla 4.1 - Olas utilizadas en el modelo de ola no estacionaria.

Obsérvese como las olas provenientes de las direcciones comprendidas entre los 105º y 135º, a pesar de tener una altura de 1.41m a una profundidad de aprox 20m (a partir de donde se propaga con RefDif), llegan a la costa en la zona donde se construiría el espigón con una altura de tan solo 0.70m. Esto se debe principalmente a que estas olas, para llegar a la zona antes mencionada, sufren la difracción ocasionada por la escollera del puerto perdiendo gran parte de su energía.

A partir de esto se concluye que todas las olas provenientes de direcciones mayores a 135º llegan a la zona en estudio con una altura significativamente reducida debido a la difracción producida por la escollera y, por lo tanto, dicho oleaje no tiene mayor influencia en el transporte litoral de sedimentos.

Una vez definidas las olas con las que se trabaja en este modelo, y que son representativas del clima general de oleaje que alcanza la costa en la zona que se está estudiando, se debe proceder a generar una serie histórica de olas para introducir al modelo. Como se ha mencionado con anterioridad, la principal diferencia entre el modelo de ola única y el modelo de ola no estacionaria radica en la serie de oleaje que utiliza cada uno. Mientras que el modelo de ola única, tal como lo indica su nombre, trabaja con una única ola en lo que a altura, período y dirección se refiere, el modelo de ola no estacionaria permite trabajar con diferentes olas, tanto en altura y período como en dirección. Esto sin embargo introduce una variable adicional ya que, conocidas las olas a utilizar y la frecuencia de ocurrencia de cada una, aún queda por definir el orden en el cual ocurre cada ola o, dicho de otro modo, la sucesión de olas a lo largo del tiempo que será, en definitiva, el dato de entrada para el modelo. Lo que se procede a hacer es, por lo tanto, una serie de olas tal que cumpla con los siguientes requisitos:

- La serie debe estar constituida por las olas definidas en la tabla anterior
- La frecuencia de ocurrencia de cada ola debe coincidir con la definida en la tabla anterior
- La distribución del oleaje a lo largo del tiempo debe ser aleatoria. Esto es para evitar situaciones poco realistas como podría ser, por ejemplo, la ocurrencia de de todo el oleaje con 53º de ángulo de propagación en los primeros 100 días del año

Para cumplir los objetivos de la serie (igual frecuencia que en los datos observados y una cierta aleatoriedad que haga que la serie sea representativa de las condiciones naturales) se decide crear una serie de oleaje de la siguiente manera:

Definida la duración de la serie se determina el número de días que actuará cada ola a partir de la frecuencia de ocurrencia de cada una de ellas. A partir de esto, se le asigna a cada uno de los días de la serie una ola (altura y dirección) que actuará durante todo el día. A partir de tener cada uno de los días con una ola asignada, se le efectúa a la serie una función (mediante Matlab) que intercala los días de manera aleatoria y por tanto cada día de la serie tiene una probabilidad de tener una ola determinada igual a la frecuencia de ocurrencia de dicha ola, y a su vez, el oleaje que hay en un día determinado es independiente del que hubo el día anterior y del que habrá el día siguiente. Esto implica a su vez que la probabilidad de que dos series de igual duración sean iguales es extremadamente baja, y por lo tanto se puede estudiar la evolución de la línea de costa a largo plazo para muchas series de oleaje distintos.

4.5. Verificación de los modelos

Para verificar que los modelos describen adecuadamente el comportamiento de la zona cercana al puerto se pretende verificar que el transporte de sedimentos en dirección al puerto, generado por la ola elegida para correr los modelos, incidiendo sobre la costa recta definida como condición inicial, es del mismo orden de magnitud que el transporte de sedimentos que se obtuvo a partir de los datos de dragado. Para esto se calcula el transporte a partir de la ecuación del flujo de energía utilizando para el coeficiente K el valor medio recomendado por el CEM para cálculos preliminares (K=0.39).

El caudal resultante es 1630m^3/día. Teniendo en cuenta que las olas con dirección original 30º y 60º ocurren aproximadamente 100 días al año, resulta:

$$Q_l = 163000 m^3 / año$$

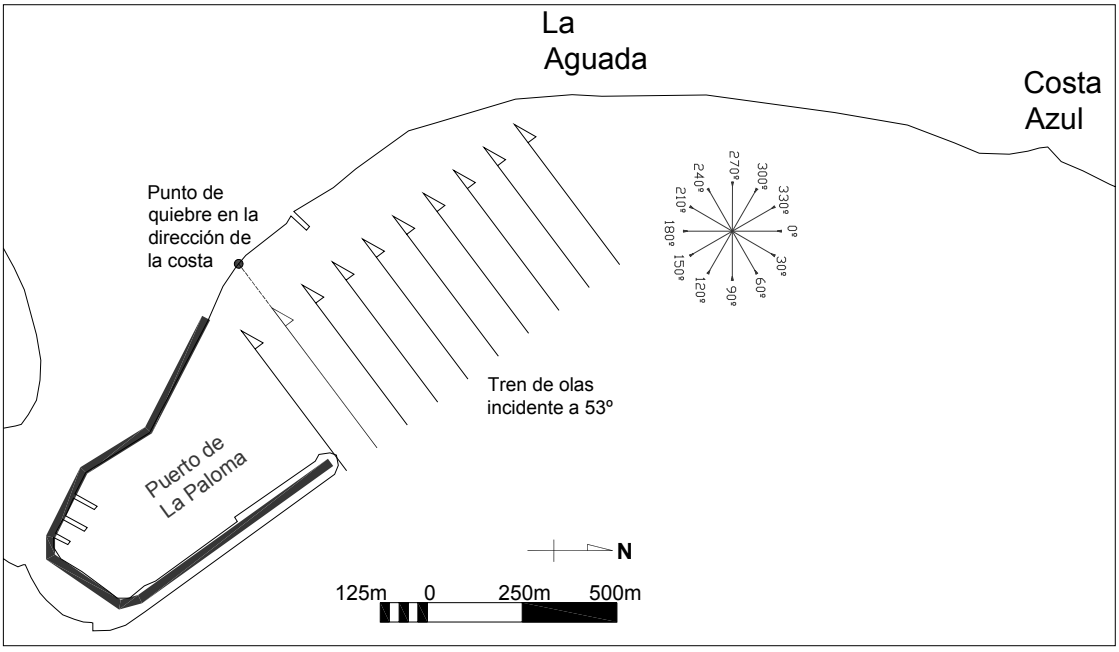
Se ve que el transporte de sedimentos anual en dirección al puerto obtenido con este procedimiento se ajusta muy bien a los resultados obtenidos a partir de los datos de dragado, según los cuales se tiene que el caudal entrante al puerto es aproximadamente 130.000m^3/año.

Por otro lado, al utilizarse el método de Del Valle, Medina y Losada para el cálculo del coeficiente K se obtienen caudales de transporte 196.000m^3/año y 177.000m^3/año para la granulometría del muelle y de La Aguada respectivamente. Si bien estos valores son un poco mayores que el anterior se mantienen muy ajustados para lo que es la precisión del método que se está utilizando.

4.6. Localización y dirección del espigón

La localización y dirección del espigón se efectuará a partir de la ola promedio que introduce sedimentos dentro del puerto, obtenida de las olas provenientes de las direcciones comprendidas entre los 15º y los 75º. Este análisis se efectúa sin perder de vista el hecho de que esta ola no es una ola real sino un promedio definido para simplificar el razonamiento y para poder aplicar ciertos modelos existentes. Esto se hace considerando que esta ola es en realidad lo suficientemente representativa de las condiciones generales del oleaje que transporta arena hacia dentro del puerto.

Bajo la hipótesis de costa recta se tiene que aguas abajo del espigón existe una corriente litoral y un transporte de arena similar al que existe aguas arriba del mismo. Esto es así porque la ola incidente tiene, en principio, el mismo ángulo relativo con la costa de aguas abajo que con la costa de aguas arriba. Al tener el mismo ángulo relativo se está en las mismas condiciones y por lo tanto se genera el mismo transporte litoral. Sin embargo, en el caso de la costa cercana al puerto, ésta no es totalmente recta, si no que, por el contrario, en la zona más próxima al puerto existe un cambio notorio en la orientación de la costa. Este cambio relativamente brusco en la dirección de la costa es aprovechado aquí para determinar la localización exacta del espigón. Si se observa la figura siguiente se puede apreciar cómo incide la dirección predominante (a menos de alguna refracción que pueda existir) en cada zona de la costa cercana al puerto. Claramente, aguas abajo del punto señalado este oleaje no genera corrientes litorales en dirección al puerto y por lo tanto es allí donde se decide colocar el espigón.

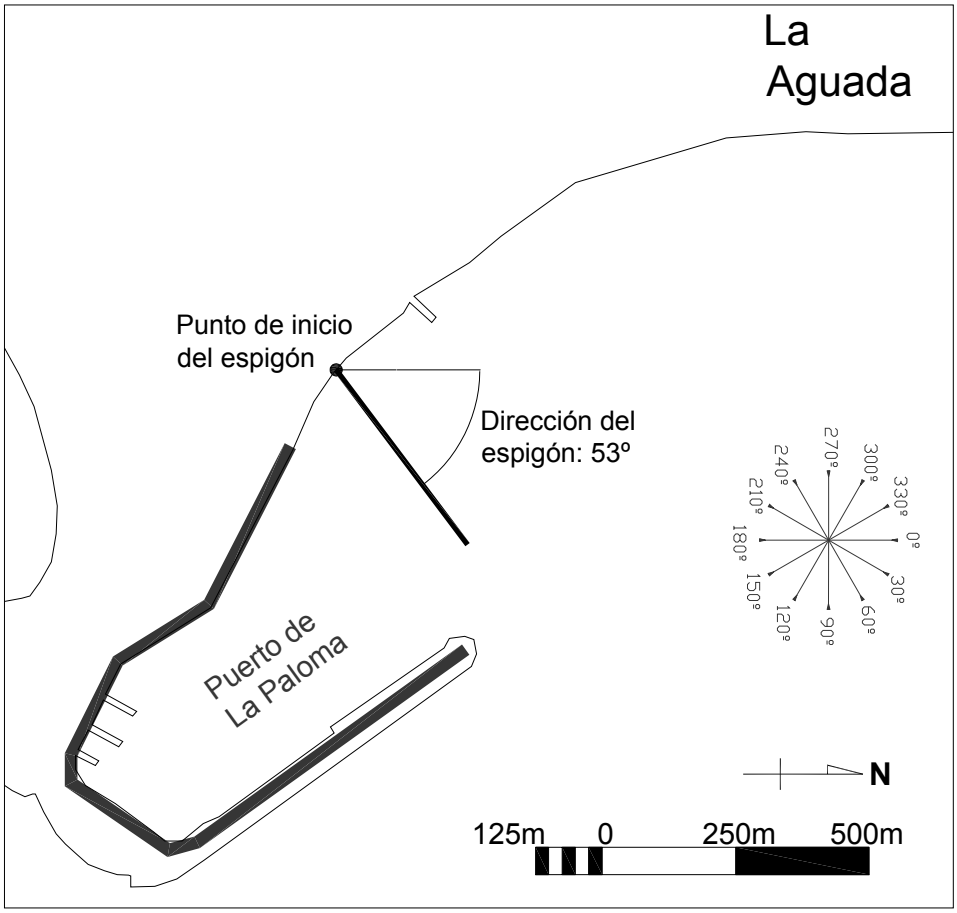


De esta forma se está asegurando que por un lado el espigón detiene las corrientes litorales ya generadas y por lo tanto evita que la arena que ellas transportan sea introducida al puerto, y por otro lado hace que aguas abajo del espigón no se generen nuevas corrientes litorales, las cuales, de formarse serían doblemente perjudiciales ya que no solo se mantendría un transporte de sedimentos hacia el puerto sino que, adicionalmente, dichos sedimentos provendrían de la zona de costa inmediata al muelle tres, lo que significa que existiría la posibilidad de un socave del extremo norte del muelle tres e inclusive del espigón.

Para definir la dirección del espigón se toma como criterio el que el mismo reciba el oleaje de forma tal de que se minimicen los esfuerzos generados por el impacto de las olas.

Claramente, para minimizar los esfuerzos sobre el espigón lo mejor es que el mismo esté alineado con la dirección del oleaje predominante. De este modo se logra que los lados del espigón reciban el oleaje se forma oblicua, ya que la ola viaja paralela al espigón. La única zona que resulta altamente solicitada de este modo es la punta del espigón, para la cual se deben tener las mayores consideraciones a la hora del diseño estructural.

La figura siguiente marca entonces la localización y la dirección del espigón. Falta aún definir la longitud del mismo.



4.7. Longitud del espigón

El objetivo del espigón es evitar la entrada de arena hacia el puerto que se genera por transporte litoral. Para lograr dicho objetivo el espigón debe ser al menos lo suficientemente largo como para abarcar la zona de rompiente del oleaje (que es hasta allí donde se da el transporte litoral) durante un porcentaje importante del tiempo en que se tiene transporte litoral en dirección al puerto. A su vez el espigón debe extenderse tierra dentro hasta la berma a fin de permitir el avance da la costa y de evitar el transporte de sedimentos en la zona de ascenso-descenso.

Para definir entonces la longitud mínima del espigón se requiere conocer la máxima distancia desde la costa a la que se da la rompiente en aquellos casos en que existe transporte hacia el puerto. Claramente esto no puede desprenderse de un análisis realizado con la ola única definida en este capítulo. Por el contrario, para conocer la máxima distancia a la que existe rompiente se debe recurrir a los resultados de las propagaciones del conjunto total de las olas. De estos resultados se desprenden dos valores que son de utilidad a la hora de definir la longitud del espigón:

- La máxima distancia a la que se tiene rompiente es 130m de la costa en el punto A; esto, claro está, considerando tan solo las olas con dirección original 30º o 60º que son aquellos que generan transporte litoral hacia el puerto.

- El 95% del oleaje rompe, con marea media, a una profundidad menor o igual a 2.7m, o sea a una distancia de la costa menor o igual a 100m.

Otro elemento a tener en cuenta a la hora de decidir la longitud final del espigón es el tiempo que tarda en llenarse el mismo. Cuanto más tiempo demore en llenarse el espigón más espaciados pueden hacerse los dragados, mayor es el volumen inicial de arena acumulado y mayor es el incremento en el ancho de la playa; sin embargo hacer un espigón mayor implica mayores costos, principalmente si se considera que cuanto más profundo se construye más caro resulta el metro de espigón.

En las secciones siguientes se aplican los modelos simplificados del espigón en una costa recta e infinita para calcular el tiempo de llenado del espigón para distintas longitudes del mismo y para estimar el volumen almacenado aguas arriba de este. A su vez se agrega a este análisis la profundidad en la punta del espigón para las distintas longitudes de este. Todos estos elementos se consideran insumos útiles para un posterior análisis del cual se desprende la longitud definitiva del espigón. También se presenta la estimación del perfil de la costa a partir de los dos modelos utilizados luego de la constricción del espigón. Esto último es un insumo de utilidad tanto para definir la longitud del espigón, como para las consideraciones ambientales.

4.8. Tiempo de llenado del espigón y forma de la costa

4.8.1. Modelo de ola única

Mediante la ecuación para el tiempo de llenado definida en la sección 4.3.2 se calcula el tiempo que tarda en llenarse el espigón en segundos. Sin embargo, para saber cuantos años tarda en llenarse el espigón se debe tener en cuanta que la ola incidente actúa tan solo 100 días al año, que es la frecuencia de ocurrencia anual de las olas con dirección original 30º y 60º.

Longitud (m)	Tiempo de llenado (años)	Arena retenida (m^3)	Profundidad en la punta (metros respecto al nivel medio de mareas)
130	2.2	356.000	3.1
150	2.9	474.000	3.3
200	5.2	842.000	3.6
250	8.1	1.316.000	3.9

Tabla 4.2 –

Una vez definido el tiempo de llenado se puede estudiar la forma aproximada que tomará la costa, a lo largo del tiempo, debido a la presencia del espigón. En la figura de la página siguiente se presenta la forma de la costa a los 3 años, o sea con el espigón de 150m lleno. En principio aquí no se hacen análisis para las otras longitudes de espigón y se supone, a modo preliminar, que la forma de la costa que se adopta con otros espigones es una paralela a la definida para el de 150m que pasa por la punta del espigón de diferente longitud.

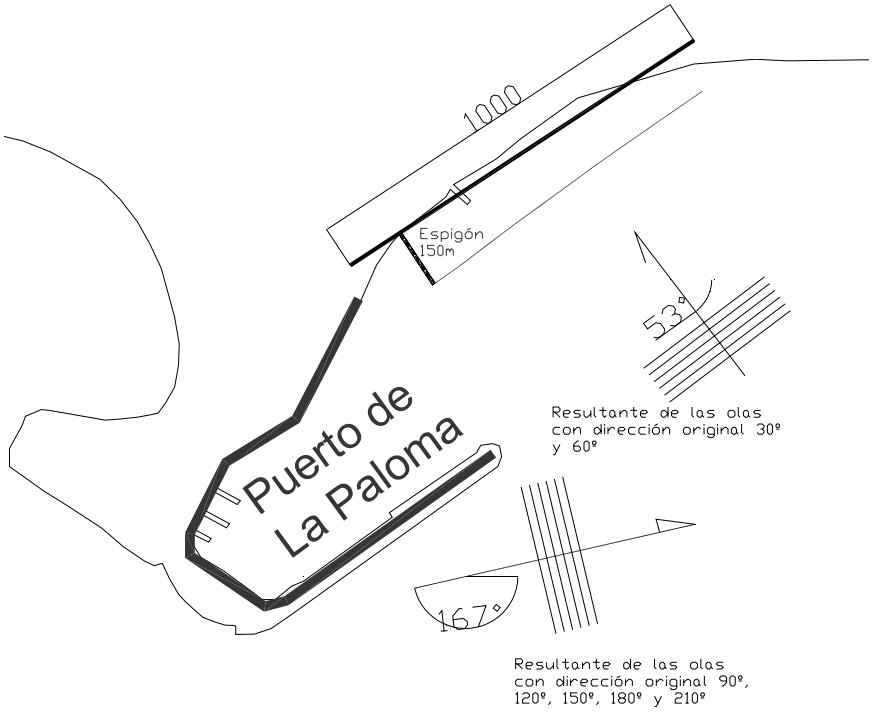


Figura 4.4 –

Cabe resaltar que los tiempos de llenado según este modelo han sido calculados considerando que no existe ninguna ola que saque la arena que se acumula en el espigón. Sin embargo esto es una consideración sumamente pesimista. Como se marca en la

elección de la ola para el modelo de ola no estacionaria hay por los menos 61 días al año con oleaje que genera un transporte litoral hacia el noreste que quita arena del espigón.

Un dato interesante que surge de este análisis es que para el espigón experimental, cuya longitud es 35m, el tiempo de llenado es 15 días (15 días ininterrumpidos de transporte en dirección sur) y el volumen de arena acumulado es menor a 30000m^3; es evidente que dicho espigón está totalmente sobrepasado y que puede llenarse y vaciarse en varias ocasiones en el correr de un año.

4.8.2. Modelo de ola no estacionaria

En este caso la solución de la ecuación de difusión considerando la ausencia de fuentes y sumideros de arena y teniendo en cuenta las condiciones iniciales y de borde señaladas en la sección 4.3.3, resulta:

$$y(x,t) = I_1 + I_2 + I_3$$

Con:

$$I_1 = 0 \qquad I_3 = 0$$

$$I_2 = -\frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \left(\int_w^t \varepsilon(u)du \right)^{-1/2} \times \exp\left(-\frac{x^2}{4\int_w^t \varepsilon(u)du} \right) \varepsilon(w)h(w)dw$$

Este resultado se logra a partir de las siguientes simplificaciones:

$$Aporte\ de\ arena\ nulo \Rightarrow \begin{cases} s(x,t) = 0 \\ r(t) = 0 \end{cases}$$

$$Costa\ inicialmente\ recta \Rightarrow y(x,0) = 0 \Rightarrow g(x,0) = 0$$

A partir de estas simplificaciones se efectúan una serie de corridas del modelo, las que se muestran a continuación. Estas corridas fueron efectuadas con series de oleaje de duración 40 años; las líneas en azul representan la posición de la línea de costa cada 5 años y la línea en rojo es la posición final de la línea costa al final del período modelado.

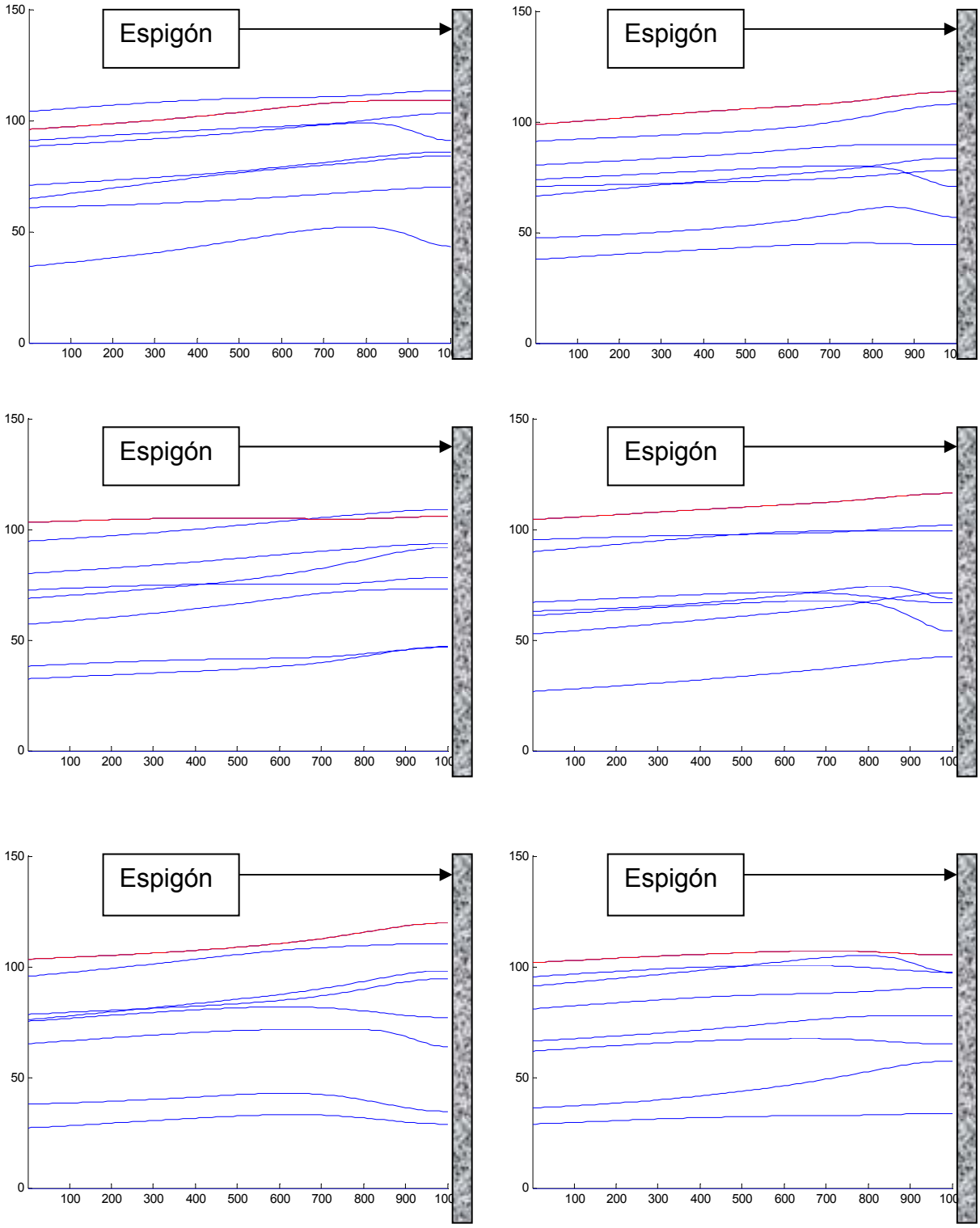


Figura 4.5 –

4.8.3. Conclusiones de la sección 4.8

Los resultados obtenidos con el modelo de ola única, como era de esperar dadas las hipótesis asumidas, evidencian una tendencia de la línea de costa a avanzar paralelamente al oleaje incidente. A efectos prácticos se puede considerar que la costa avanza paralela a su posición actual. La velocidad de avance es alta, produciéndose un avance de 150m en aproximadamente 3 años.

Al analizar los resultados obtenidos con el modelo de ola no estacionaria se observan ciertas oscilaciones en la posición de la línea de costa que pueden hacer retroceder la línea de costa en las cercanías del espigón en el corto y mediano plazo, pero que tienden a engrosarla en el largo plazo. El hecho de observar estas oscilaciones, sumado a las diferencias en los tiempo de llenado del espigón entre los dos modelos, permiten afirmar que la arena que es depositada en el espigón puede ser transportada bajo ciertas condiciones de oleaje nuevamente en dirección noreste, aumentando así el tiempo de llenado del espigón. Esto último es relevante a la hora de efectuar el plan de gestión y mantenimiento del espigón.

A partir de los resultados obtenidos con el modelo de ola no estacionaria se puede afirmar que los resultados obtenidos con el modelo de ola única, en lo que al tiempo de llenado del espigón respecta, son excesivamente conservadoras. No obstante, si bien el modelo de ola no estacionaria permite un acercamiento mayor a la realidad que el modelo de ola única, los resultados del mismo no deben tomarse como absolutos dadas las simplificaciones que se han hecho para aplicar el mismo.

Finalmente, a pesar de no disponer de un método que permita cuantificar con exactitud la velocidad de avance de la línea de costa (tiempo de llenado del espigón), los resultados obtenidos permiten concluir que:

- La línea de costa tendrá tanto avances como retrocesos con una tendencia a largo plazo al avance. De forma similar la orientación de la costa presentará cambios a corto plazo pero la tendencia a largo plazo será orientarse perpendicularmente a los 53º lo cual es, a efectos prácticos, paralelo a la posición actual.

- El orden de la tasa de avance de la línea de costa es aproximadamente 50m en 10 años. Este orden de avance está determinado por el transporte neto en la zona y se considera constante a lo largo del tiempo e independiente del grado de avance de la costa.

4.9. Conclusiones

En la sección 4.6 se ha definido la posición y la dirección del espigón. Resta por definir la longitud del espigón. Para definir la longitud del espigón se debe tener en cuenta:

a) Una mayor longitud el espigón implica costos de construcción mayores, no solo en términos absolutos, si no también en relativos, ya que a mayor profundidad mayor costo por metro lineal de espigón.

b) Si bien una mayor longitud del espigón permite una mayor retención de arena, con lo cual se logra un incremento del tiempo entre los dragados de mantenimientos (necesarios estos para evitar que el espigón se vea sobrepasado), la tasa anual de acumulación de arena no se ve afectada; en definitiva, un espigón más largo permite espaciar más los dragados pero el volumen medio anual a ser dragado será el mismo para cualquier longitud.

c) A fin de cubrir en su totalidad la zona de rompiente (que es aquella en la cual ocurre el transporte) para un 95% del oleaje incidente, el espigón debe tener, desde la línea de costa hasta la punta, una longitud mínima de 100m (considerando siempre marea media).

d) El espigón debe extenderse hasta la berma. La distancia desde la línea actual de costa hasta la berma es aproximadamente 50m.

Se concluye entonces que la longitud del espigón está dada por la ecuación:

$$L=Lo+Lmin+L(t_{drag})$$

En donde:

Lo=longitud desde la línea actual de costa hasta la berma=50m
Lmin=longitud mínima para cubrir la zona de rompiente el 95% del tiempo=100m
$L(t_{drag})$=longitud adicional para retener arena, la cual es una función del tiempo entre dragados que defina como más conveniente el administrador del puerto

Dado que no se dispone de contraparte para definir el tiempo óptimo entre dragados se tomara éste como 10 años. Se considera éste un tiempo prudencial para espaciar los dragados por dos razones: a) tiempos menores implicarían continuos traslados de la draga y b) tiempos mayores implican incrementos mayores de la longitud y costos cada vez mayores. El volumen estimado a ser dragado cada 10 años es 130.000m^3 (50m de avance en una longitud de 500m con una diferencia de cota entre la berma y la profundidad en la punta del espigón de 5,3m aproximadamente).

Con esto resulta ser la longitud total del espigón 200m, 50m tierra dentro desde la línea de costa actual y 150m aguas adentro desde la línea de costa actual. La dirección del espigón es 53º desde el norte y su localización se aprecia en la figura siguiente. En la misma se presenta también la línea de costa estimada a los diez años de instalado el espigón.

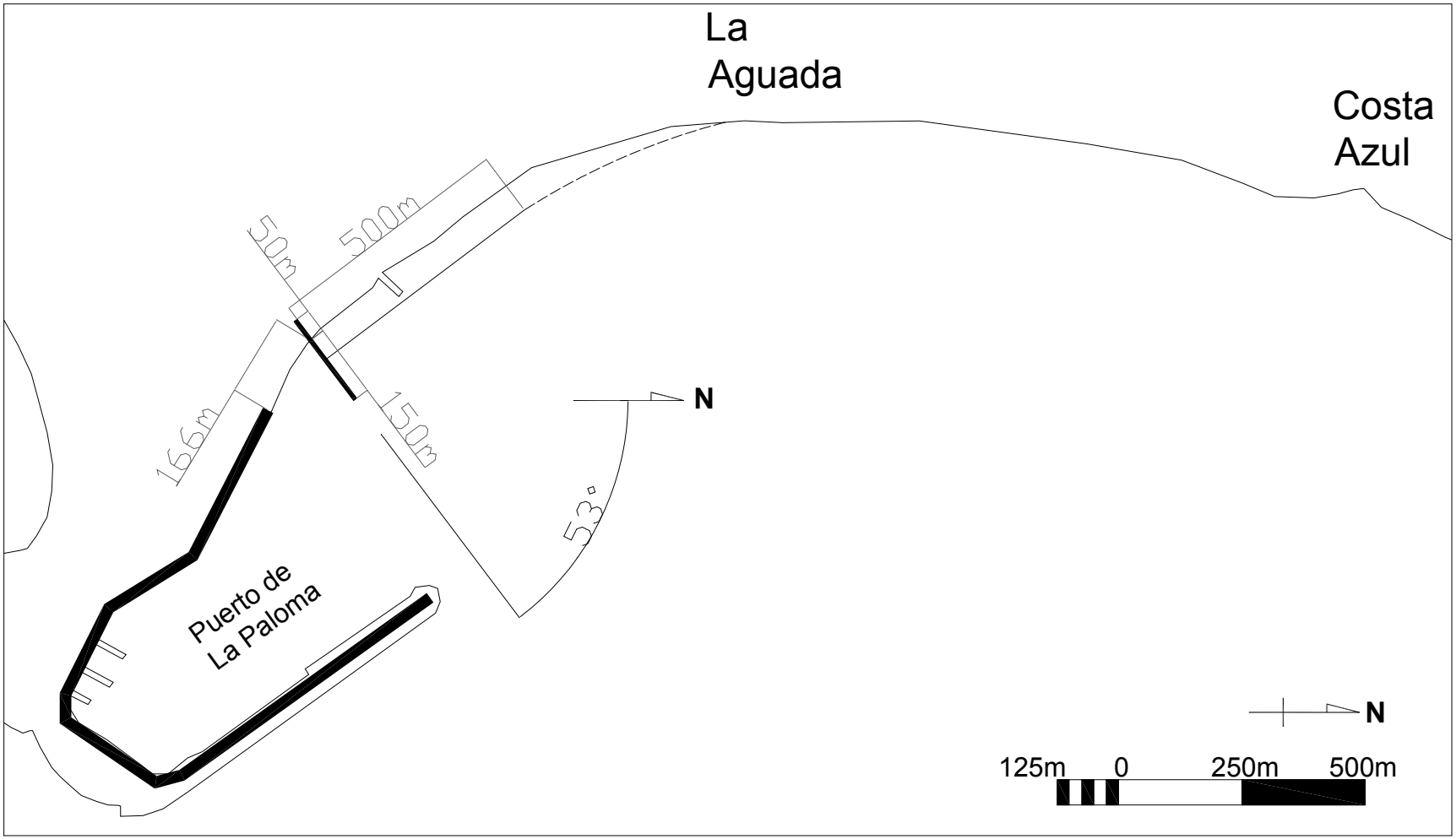


Figura 4.6 – Localización final del espigón

CAPITULO 5 – Selección de tipología y diseño estructural del espigón

5.1. Introducción

A partir de la localización en planta del espigón se procede aquí a la selección de la tipología y al diseño del mismo desde el punto de vista estructural. Para ello en la sección 2 se determinan las solicitaciones extremas a las que estará sometido el espigón. Más adelante, en la sección 3, se hace una presentación de las dos tipologías posibles y se justifica la selección de un espigón de tipo de material suelto. En la sección 4 se describen de forma general cada uno de los elementos a tener en cuenta en el diseño de una estructura de material suelto. En las secciones 5 y 6 se presentan los diseños finales del espigón para cada una de las posibles opciones constructivas. Finalmente en la sección 7 se presentan elementos adicionales para justificar la elección de un espigón de tipo de material suelto.

5.2. Cálculo de los parámetros de diseño

5.2.1. Introducción

Hasta ahora se ha trabajado con datos climáticos medios. Ahora, para definir las características estructurales del espigón, se debe contar con parámetros de diseño característicos de condiciones extremas. En esta sección se detalla el procedimiento seguido para definir los parámetros de diseño para un tiempo de retorno 10 años, que es el utilizado para diseñar esta estructura.

5.2.2. Procedimiento

Para calcular el transporte litoral en el arco de playa La Paloma-La Pedrera se determinó un clima de olas en la costa de manera de conocer la altura, período y frecuencia de las olas que a ésta inciden. Este clima de olas se halló a partir de un clima de olas en aguas profundas tomando como entrada los ya mencionados datos visuales proporcionados por el servicio meteorológico inglés. Estas olas en aguas profundas fueron propagadas hacia la costa, de manera de conocer sus características al llegar a ella.

Estas propagaciones se realizaron en dos etapas. Primero se propagaron desde aguas profundas hasta una profundidad de aproximadamente 20metros (que coincide aproximadamente con el borde exterior de la carta 19 del SOHMA). Hasta este punto la incidencia fundamental la tienen los fenómenos de refracción y asomeramiento. Para esta propagación se utilizó el programa SoloRef. En una segunda etapa se propagaron con el programa Ref-Dif, contando con una malla de datos más densa producto de la mayor información de la batimetría en las cercanías a la costa. Este programa combina tanto los fenómenos de refracción, asomeramiento, disipación por fondo y difracción. Esta segunda propagación brinda el clima de olas en la costa.

En principio esto sería suficiente para determinar una ola de diseño de cierto período de retorno de no ser por ciertas hipótesis tomadas en la propagación que pueden estar interfiriendo en el valor de la altura de ola, en particular la hipótesis de marea media para todas las propagaciones.

Si se compara una propagación con marea alta y una con marea media se pueden encontrar diferencias significativas en lo que a la altura de ola respecta. Esto se debe a dos factores principalmente:

1. La mayor parte de la pérdida de energía que sufre el oleaje a medida que es propagado, en una hipótesis de atmósfera hidrostática, es a partir de su rozamiento con el fondo. Esta pérdida de energía es función inversa de la profundidad en cada punto, por lo que, en caso de elevar el nivel medio de marea la energía disipada disminuye, incrementando la altura de ola en la comparación.

2. Cabe la posibilidad que a cierta distancia de la costa, por ejemplo en la punta del espigón (150 metros), la altura de ola hallada con la marea media esté condicionada por la profundidad. En el caso de trabajar con una condición de marea alta, ésta condición de rotura no se estaría dando de la misma forma, de manera que se tendría mayor altura de ola, independientemente de la fricción de fondo vista en el punto anterior.

Es por estos factores que se decide efectuar el análisis estadístico de las olas luego de la primera propagación efectuada por el programa Solo-Ref, para luego propagar las olas halladas (según la dirección) para el período de retorno dado mediante el programa Ref-Dif con una condición de marea alta. Una vez obtenida la ola resultante en la zona del espigón para cada una de las olas incidentes se tomará la máxima de ellas como ola de diseño. En caso de que la máxima de las olas obtenidas supere el límite de altura de ola permitido por la profundidad de la zona, entonces se toma la ola determinada por profundidad como ola de diseño.

Cabe destacar que la primera propagación se realiza con un nivel de marea media en vez de marea alta. Si bien para la ola de diseño se trabaja con marea alta, este diferencia no es significativa dada la gran profundidad (más de 20metros) con que se efectua la primera propagación.

5.2.3. Análisis estadístico de las olas

La primera propagación mediante el programa Solo-Ref arroja los resultados que se presentan en la **tabla 5.1**. Dicha tabla presenta tan solo las olas provenientes de direcciones menores a 150º. El oleaje proveniente de direcciones mayores que ésta no llega con suficiente energía a la zona del espigón debido a la protección del rompeolas.

T (s)	Dirección	Hs (m)	Frecuencia de ocurrencia	Registros
5,0	30	0,3	3,7%	206
5,0	30	0,8	2,3%	130
5,5	30	1,3	2,5%	139
7,4	45	1,4	1,1%	60
13,3	65	1,5	0,7%	37
15,8	70	1,7	0,2%	12
7,5	45	2,5	0,2%	11
8,0	45	2,8	0,1%	3
10,0	55	2,8	0,0%	1
5,0	60	0,3	4,9%	272
5,0	60	0,8	4,4%	245
5,5	60	1,3	4,0%	224
7,4	69	1,6	2,0%	112
13,3	92	1,7	0,8%	44
15,8	102	2,0	0,4%	20
7,5	69	2,8	0,4%	21
8,0	69	3,2	0,1%	5
10,0	81	2,9	0,0%	0
5,0	90	0,3	2,1%	117
5,0	90	0,8	2,3%	126
5,5	90	1,3	2,8%	154
7,4	95	1,6	1,2%	67
13,3	105	1,8	1,1%	63
15,8	108	2,0	0,4%	22
7,5	95	3,0	0,3%	17
8,0	95	3,6	0,0%	1
10,0	100	3,7	0,0%	0
5,0	120	0,3	1,3%	70
5,0	120	0,8	1,2%	64
5,5	120	1,3	1,8%	102
7,4	122	1,6	0,8%	47
13,3	122	1,7	0,9%	49
15,8	122	1,9	0,4%	25
7,5	122	3,0	0,3%	14
8,0	122	3,6	0,1%	4
10,0	122	3,7	0,0%	2

Tabla 5.1 -

En la tabla se observa altura, período, dirección y frecuencia de oleaje. Se decide trabajar para el diseño de la escollera, y por tanto para la determinación de la ola de diseño, con tiempo de retorno igual a 10 años.

El hecho de contar con un período de observación de 47.5 años permite asumir que los datos son suficientemente representativos del clima de oleaje general de la zona, y por tanto permite trabajar directamente con los datos para hallar la ola de 10 años de período de retorno.

Se asume que los datos siguen una probabilidad según Weibull. Luego de ordenarlos de mayor a menor, la probabilidad que se le asigna a cada dato está dada por la siguiente relación:

$$P(X \geq x) = \frac{n}{m+1}$$

Donde:

n =posición que ocupa el dato
m =cantidad de datos

Esta fórmula tiene como ventaja que no le asigna el 100% de probabilidad a ningún dato. En contrapartida, al primer dato le asigna un tiempo de retorno de m+1 siendo m el total observado.

Teniendo la cantidad de datos y la probabilidad buscada es sencillo hallar la posición del dato que cumple con esa probabilidad según Weibull.

Para hallar la probabilidad que corresponde a un tiempo de retorno de 10 años se utilizan la relación:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T}$$

Donde T es la cantidad promedio de datos que fueron observados para el tiempo de retorno buscado.

De esa manera:

$$P(X \geq x) = \frac{1}{T_o(m/t)}$$

Donde=

T_o =tiempo de retorno buscado (años)
m =cantidad de datos
t =tiempo de observación (años)

Igualando esta relación a la probabilidad dada por Weibull obtenemos:

$$\frac{n}{m+1} = \frac{1}{T_o(m/t)} \Rightarrow n = \frac{t \cdot (m+1)}{T_o \cdot m}$$

Si m es “grande”, la relación queda:

$$n \approx \frac{t}{T_o}$$

Obsérvese que, mientras que m sea “grande”, la relación es independiente del número de observaciones. Obsérvese a su vez que si se hubiera trabajado con la fórmula de California para la asignación de probabilidades a los datos

(P(X>=x)=n/m), n quedaría independiente de la cantidad de observaciones para cualquier m.

Si tomamos t= 47.5 años y T_o= 10 años, entonces:

$$n = 4.75 \cong 5$$

Debido a que los datos están presentados en forma discreta se decide suponer, dentro de cada intervalo, una distribución uniforme de manera de poder determinar el enésimo dato (en este caso el 5°). De esta manera solamente hay que distribuir y ordenar los intervalos necesarios que aseguren poder obtener el 5° dato en orden descendente de altura de ola. Se obtienen entonces las siguientes olas con período de retorno 10 años:

Ola orignal Tr=10años		
Hs (m)	Dir	T (s)
2,7	45	8
3,2	69	8
3,5	95	8
3,6	122	8

Tabla 5.2 -

Ahora, al propagar dichas olas hasta la zona de mayor profundidad del espigón utilizando RefDif e imponiendo marea alta de 10 años de período de retorno, se obtiene:

Ola orignal Tr=10años			Ola propagada	
Hs (m)	Dir	T (s)	Hs (m)	H 1/10 (m)
2,7	45	8	3,0	3,8
3,2	69	8	2,2	2,8
3,5	95	8	1,3	1,6
3,6	122	8	0,7	0,8

Tabla 5.3 -

Como parámetro de diseño se aconseja utilizar $H_{1/10}$ en lugar de H_S. Aquí $H_{1/10}$ máximo es 3.8m, por lo tanto ésta es, en principio, la ola de diseño. Sin embargo dado que la profundidad en la punta del espigón con marea alta es 2.2m la ola máxima posible limitada por profundidad es 3.6m por lo cual será ésta la ola de diseño y no la ola obtenida de las propagaciones.

Se concluye entonces que para las condiciones de diseño el oleaje en todas las secciones del espigón, desde la punta hasta la costa, está limitado por profundidad. Por lo tanto la ola de diseño para un período de retorno de 10 años, para cada sección, está dada por la máxima ola posible dada la profundidad existente en dicha sección con marea alta de 10 años de período de retorno.

En particular, la ola de diseño en la sección más comprometida de la estructura (la punta del espigón) tiene una altura de 3.6m, limitada por la profundidad en la punta del espigón que es 4.6m con marea alta de 10 años de período de retorno.

5.3. Tipología del espigón

Existen dos tipologías de espigón a considerar para este proyecto:

1. Espigón de material suelto, natural (roca) o artificial (hormigón)
2. Espigón vertical de material artificial (hormigón)

Estas dos tipologías se diferencian no sólo por sus características estructurales sino también por los efectos diferentes que generan en el entorno. En particular las estructuras verticales son (a no ser que se tomen precauciones especiales) altamente reflejantes. Esto tiene como consecuencia directa que la altura de ola en la zona cercana al espigón se vea incrementada debido a la superposición de la onda incidente con la reflejada. A su vez esto tiene consecuencias secundarias, entre las cuales se destacan: a) se incrementa la solicitación dinámica sobre la estructura y b) el incremento en la altura de ola incrementa el potencial de la misma para socavar la fundación de la estructura. Por otro lado la estructura de material suelto produce una alta disipación de energía con lo cual se logra: a) tener solicitaciones menores sobre la estructura que en el caso de un espigón vertical y b) disminuir el potencial de socavación de la acción del oleaje.

Respecto a los modos de fallo de las tipologías presentadas cabe decir que para el espigón vertical de hormigón en caso de falla la misma es catastrófica mientras que el espigón de material suelto falla de forma no catastrófica (en general por reacomodo de la capa exterior o por hundimiento de parte de la misma en el suelo natural). Esto es sumamente importante en un proyecto como éste en el cual la función que debe cumplir la obra no justifica el diseñar con tiempos de retorno elevados y por lo tanto en caso de diseñar una solución de tipo vertical sería altamente probable que la misma falle (como se ha dicho de forma catastrófica) a corto plazo. Por otro lado al diseñar con bajo período de retorno una estructura de tipo de material suelto se debe planificar con cierto cuidado un plan de monitoreo y mantenimiento (ver capítulo 7) pero se puede estar seguro que en caso de fallo el mismo será no catastrófico y por lo tanto la obra continuará cumpliendo su función y podrá ser reparada.

De lo dicho hasta el momento se desprende que, para este caso en particular, resulta ser más recomendable una solución de tipo material suelto que una de tipo vertical. Esto a su vez se ve reforzado por el hecho que las fuentes consultadas no recomiendan la utilización de estructuras verticales de hormigón a menos que se esté trabajando con profundidades de un orden mayor a los 12m, lo cual claramente no es el caso aquí ya que como se ha visto en la sección anterior la profundidad en la punta del espigón con marea máxima es 4.6m.

En lo que sigue se presentan dos diseños de espigón de material suelto. Al final se presenta un prediseño de un espigón vertical a partir del cual se dan nuevos elementos que justifican la elección del espigón de material suelto.

5.4. Espigón de material suelto natural o artificial

El diseño estructural aquí es el mismo ya sea que se use material suelto natural (cubos de material pétreo) o artificial (cubos macizos de hormigón). En lo que sigue se definirá la estructura refiriéndose siempre a la roca en forma general y lo que determinará si dicha roca es natural (rocas de cantera) o artificial (hormigón) será el posterior estudio de costos.

Para poder llevar a cabo dicho estudio de costos se debe disponer de una estimación del volumen de material requerido, tanto de roca como de hormigón. El procedimiento a seguir es el siguiente:

a) se procede a diseñar los requerimientos estructurales generales (peso de los elementos, filtros, etc.)

b) se hace un diseño de la estructura considerando material pétreo (densidad 2600kg/m3) y se estiman los volúmenes requeridos

c) con los volúmenes obtenidos se hace el estudio de costos a fin de comparar los costos de construir con hormigón con los costos de construir con material pétreo

d) en caso que del análisis preliminar de costos se pueda concluir que el uso de hormigón es una alternativa económicamente competitiva entonces se procede a hacer un diseño más detallado para dicha alternativa (densidad aproximada 2200kg/m3)

Cuando se diseña un espigón de material suelto se puede pensar que el mismo sea no sobrepasado, sobrepasado o sumergido. Para una altura de marea y una ola de diseño dadas (ya establecidas en la sección 5.2.3) será la cota de coronamiento del espigón la que determine en cuál de las condiciones antes señaladas se encuentra el mismo. La condición de no sobrepasado es la más exigente desde el punto de vista de la estabilidad de la estructura: por un lado requiere rocas de protección más grandes que el espigón sobrepasado y mucho mayores que las del sumergido; por otro es mayor la solicitación en la fundación ya que la carga por metro cuadrado resulta ser mayor cuanto más alto se corone el espigón. A su vez cuanto mayor sea la cota de coronamiento mayor será el volumen requerido de roca y por lo tanto mayor el costo total de los materiales.

Por todo lo dicho parece lógico pensar que la solución más conveniente es entonces un espigón sumergido, más si se tiene en cuenta que un espigón de estas características minimiza el posible impacto visual. Sin embargo antes de hacer una elección definitiva se deben tener en cuenta aspectos constructivos que pueden ser determinantes a la hora de llevar a cabo el proyecto, especialmente en una zona como el departamento de Rocha en la cual es de esperar que los equipos requeridos para la construcción sean un factor limitante.

Para la construcción de un espigón de material suelto existen dos procedimientos claramente diferenciados:

1. Construcción desde tierra, avanzando con el equipo de construcción sobre lo ya construido.
2. Construcción desde agua, depositando el material desde barcazas y pontones.

Claramente el primer procedimiento constructivo presentado es mucho menos exigente en cuanto a los equipos que requiere. Para éste alcanza con disponer de los equipos de uso común en caminería (bulldozers, palas cargadoras, etc) y algún tipo de grúa que trabaje desde tierra. Sin embargo para construir un espigón sumergido se procede trabajando desde el mar como lo establece el procedimiento 2. Este procedimiento requiere equipos mucho más específicos a los cuales puede ser difícil acceder o, en caso de tener acceso a ellos, su costo puede ser demasiado elevado para la escala de este proyecto.

Visto lo anterior y considerando que al momento no se cuenta con información suficiente en cuánto a la disponibilidad y costos de los equipos se opta aquí por presentar dos diseños estructurales diferentes: a) un espigón sumergido que requiere ser construido desde mar y b) un espigón sobrepasado tal que permita ser construido desde tierra.

En ambos casos se estudia la estabilidad del espigón de a tramos de modo de poder considerar para cada uno de los tramos la ola máxima incidente (siempre limitada por profundidad). Adicionalmente, dado que el nivel de marea cambia las condiciones de diseño (p. ej. un espigón sumergido con marea alta puede resultar no sobrepasado con marea baja) se estudia la estabilidad de cada tramo en los casos de marea máxima (período de retorno 10 años), marea media y marea mínima (período de retorno 10 años).

El diseño estructural en cada caso consiste en la definición de los siguientes elementos para cada tramo del espigón:

a) Sección
b) Tamaño de roca de la capa exterior
c) Tamaño de roca de la segunda capa
d) Características del núcleo
e) Diseño de la protección del pie y de la protección contra la socavación
f) Diseño de los filtros tanto en la fundación como en el interior de la estructura

A continuación se presentan las formulaciones utilizadas para definir cada uno de los elementos presentados. En las secciones siguientes se presenta el diseño final del espigón sobrepasado y del espigón sumergido respectivamente (utilizando la densidad del material pétreo).

5.4.1. Generales sobre el tamaño de roca y la sección

La capacidad de una estructura de material suelto de resistir el ataque del oleaje sin excesivo movimiento de las rocas (sin fallar) está dada por el peso de las rocas. Para determinar el peso mínimo para el cual la estructura resulta estable frente al oleaje existen varias formulaciones empíricas según el tipo de estructura. A continuación se especifican las distintas fórmulas de estabilidad utilizadas (todas ellas extraídas del CEM):

- ***Espigón no sobrepasado:***

  Fórmula de Hudson (1974)

$$M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha}$$

  Donde:
  - H Altura de ola característica
  - M_{50} Masa media de las rocas $M_{50}=\rho_s D_{n50}^3$
  - D_{n50} Lado medio de las rocas
  - ρ_s Densidad de las rocas
  - ρ_w Densidad del agua
  - α Ángulo de la pendiente
  - K_D Coeficiente de estabilidad

  Esta formula da resultados conservadores. Solo es usada de referencia a la hora de evaluar los resultados obtenidos con las demás fórmulas.

  Fórmula de Van der Meer (1988)

  Esta fórmula tiene dos variantes según se tengan olas “plunging” (1ª variante presentada) o olas “surging” (2ª variante presentada)

$$\frac{H_S}{\Delta D_{n50}} = 6.2 S^{0.2} P^{0.18} N_Z^{-0.1} \xi_m^{-0.5} \qquad \xi_m < \xi_{mc}$$

$$\frac{H_S}{\Delta D_{n50}} = S^{0.2} P^{-0.13} N_Z^{-0.1} (\cot \alpha)^{0.5} \xi_m^{P} \qquad \xi_m > \xi_{mc}$$

$$\xi_m = s_m^{-0.5} \tan \alpha \qquad \xi_{mc} \left(6.2 P^{0.31} (\tan \alpha)^{0.5} \right)^{\frac{1}{P+0.5}}$$

  Donde:
  - H_S Altura de ola significativa frente al rompeolas
  - D_{n50} Lado medio de las rocas
  - ρ_s Densidad de las rocas
  - ρ_w Densidad del agua
  - Δ $(\rho_s / \rho_w - 1)$
  - S Área relativa erosionada
  - P Permeabilidad
  - N_Z Número de olas

α Ángulo de la pendiente de la estructura
s_m Empinamiento de la ola H_S/L_{om}
L_{om} Longitud de onda en aguas profundas para el período medio

Estas ecuaciones son válidas para altura de ola en zonas no limitadas por profundidad. Si es una zona limitada por profundidad H_S se debe sustituir por $H_{2\%}/1.4$
En caso de cot α >=4 solo la primera ecuación debe ser usada.
Con N_Z>7500 se alcanza una situación de equilibrio en lo que al nivel de daño respecta.
La validez de las fórmulas es:

$$0.1 \le P \le 0.6 \quad 0.005 \le s_m \le 0.06 \quad 2ton/m^3 \le \rho \le 3.1ton/m^3$$

- ***Espigón sobrepasado:***

Fórmula de Van der Meer (1991)

Se utilizan las mismas fórmulas que para el caso del espigón no sobrepasado pero sustituyendo D_{n50} por $f_i D_{n50}$ en donde:

$$f_i = \left(1.25 - 4.8 \frac{R_c}{H_S} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}}\right)^{-1}$$

Siendo: s_{op} $=H_S/L_{op}$
L_{op} Longitud de onda en aguas profundas para el período pico
R_c Distancia desde la cota de coronación hasta el nivel medio del agua
La validez de la fórmula es:

$$0 < \frac{R_c}{H_S} \sqrt{\frac{s_{op}}{2\pi}} < 0.052$$

- ***Espigón sumergido:***

Fórmula de van der Meer (1991)

$$\frac{h'_c}{h} = (2.1 + 0.1S)\exp(-0.14N_S^*)$$

Donde: h Profundidad del agua
h'_c Altura de la estructura
S Área relativa erosionada
N^*_s Número de estabilidad espectral

$$N_S^* = \frac{H_S}{\Delta D_{n50}} s_{op}^{-1/3}$$

La sección del espigón consistirá en ambos casos en:

a) Una capa exterior de roca diseñada para soportar el ataque del oleaje. Dicha capa tendrá un espesor tal que permita colocar dos rocas.

b) Una segunda capa o capa intermedia la cual constará de dos rocas cuyo peso medio será igual a 1/10 del peso medio de las rocas de la capa exterior.

c) En caso de que fuere necesario se incluirá un núcleo de material fino cuyo peso oscilará entre 1/200 y 1/4000 del peso medio de la capa exterior.

La figura siguiente muestra la sección tipo con núcleo de material fino.

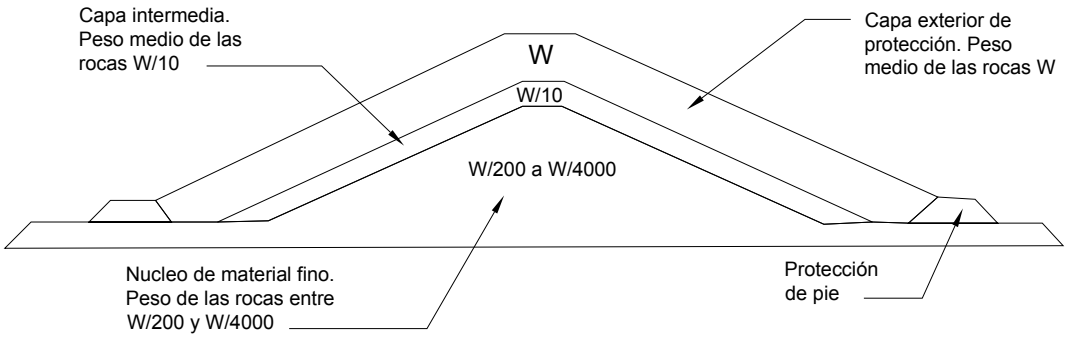


Figura 5.1 – Sección tipo del espigón

El núcleo de la sección no requiere mayores especificaciones para su construcción que las ya hechas respecto al peso de la roca. Para construirlo se suele usar todo tipo de roca sobrante de la cantera.

5.4.2. Generales sobre la protección de pie

Para asegurar que la estructura exterior sea estable y no exista un deslizamiento de las rocas se debe construir una protección especial al pie de la estructura. Dicha protección es la encargada de dar buen apoyo a la capa exterior de roca. Para el diseño de dicha protección se debe determinar: tamaño de roca, número de capas a colocar y ancho de la protección. Para determinar estos elementos se utilizan las formulaciones empíricas que se detallan en el CEM:

Markle (1989)

Markle propone una relación (presentada en forma de ábaco) entre el número de estabilidad mínimo y la relación de profundidad:

$$N_S^3 = f\left(\frac{h_b}{h_S}\right)$$

Donde:
$N_S=H/\Delta D_{n50}$

H=altura de ola frente al rompeolas
$\Delta=(\rho_s/\rho_w-1)$ con ρ_s densidad de la roca y ρ_w densidad del agua
D_{n50}=lado de la roca media
h_b es la altura de agua por encima del coronamiento de la protección de pie
h_s es la altura de agua frente al rompeolas

Markle también recomienda extender la protección de pie una distancia B igual a $3D_{n50}$.

Van der Meer, d'Angremond y Gerding (1995)

$$N_S = \frac{H_S}{\Delta D_{n50}} = \left(0.24 \frac{h_b}{D_{n50}} + 1.6 \right) N_d^{0.15}$$

Donde a los parámetros ya definidos se agrega N_d que es el nivel de daño. Representa el número de rocas movidas en una protección de 2 o 3 rocas de alto por 3 a 5 rocas de ancho (distancia B) por cada D_{n50} metros de longitud del espigón. Los valores posibles son: 0.5=no daño, 2=daño aceptable, 4=daño severo.

El rango de validez de esta formulación es:

$$0.4 < \frac{h_b}{h_S} < 0.9 \quad 0.28 < \frac{H_S}{h_S} < 0.8 \quad 3 < \frac{h_b}{D_{n50}} < 25$$

5.4.3. Generales sobre la fundación

Una vez definida una sección tipo y un tamaño de roca tal que asegure que el espigón será estable ante el ataque del oleaje se debe verificar que la fundación del espigón es adecuada. Existen varios tipos de fallas posibles en lo que a la fundación respecta:

a) Asentamiento
b) Socavación por acción del oleaje
c) Pérdida de poder soporte del suelo por liquefacción de la arena
d) Pérdida de material de fundación a través de la capa exterior de roca

Dadas las características de la fundación (una capa de 5m de arena) es esperable que exista un asentamiento moderado (algunos centímetros) durante la construcción, no generándose problemas posteriores.

El fenómeno de socavación es muy complejo. Las pocas formulaciones empíricas existentes para estimar la profundidad de socavación al pie de una estructura costera son poco confiables y tan solo permiten tener una aproximación de la profundidad de socavación bajo hipótesis muy restrictivas y alejadas de la realidad.

El CEM propone aproximar la profundidad de socavación mediante las formulaciones existentes para luego diseñar una protección que alcance dicha

profundidad. La protección se hace retirando el material natural y extendiendo la protección de pie hasta la profundidad estimada de socavación.

La protección contra la socavación junto con los filtros que se deben colocar para evitar la pérdida de material a través de las capas de roca de protección ya son garantía suficiente de que no existirán problemas de licuefacción de la fundación (CEM).

Para evitar la pérdida de material de fundación a través de las rocas de protección se deben construir filtros de roca entre la estructura misma y el suelo de fundación. La granulometría de dichos filtros debe cumplir con ciertos requerimientos estipulados en el CEM:

Criterio de retención: $$\frac{d_{15\ filtro}}{d_{85\ fundación}} < 4-5$$

Criterio de permeabilidad: $$\frac{d_{15\ filtro}}{d_{15\ fundación}} > 4-5$$

Criterio de estabilidad interna: $$\frac{d_{60\ filtro}}{d_{10\ filtro}} < 10$$

Donde d_i es el diámetro de grano excedido por el (100- i)% del material.

El espesor mínimo del filtro debe ser tal que permita acomodar al menos tres diámetros medios y nunca menor a 30cm.

5.5. Diseño final del espigón sobrepasado

Este diseño corresponde al espigón que se construye desde tierra. El procedimiento constructivo considerado consiste en ir avanzando con la maquinaria sobre un camino de tosca construido sobre la capa intermedia de roca. Para que esto sea factible se diseña la estructura de forma tal que el coronamiento de la capa intermedia quede siempre 0.5m por encima del nivel medio de mareas.

Para el cálculo estructural se definen secciones cada 25m como se muestra en la figura 5.2. Para cada una de dichas secciones se calcula: tamaño de roca exterior, tamaño de roca intermedia, tamaño de roca en protección de pie, profundidad de la protección contra la socavación. Los resultados obtenidos junto con las características que debe tener el filtro se presentan a continuación. Las piezas gráficas correspondientes a este espigón se encuentran en el **Anexo II**.

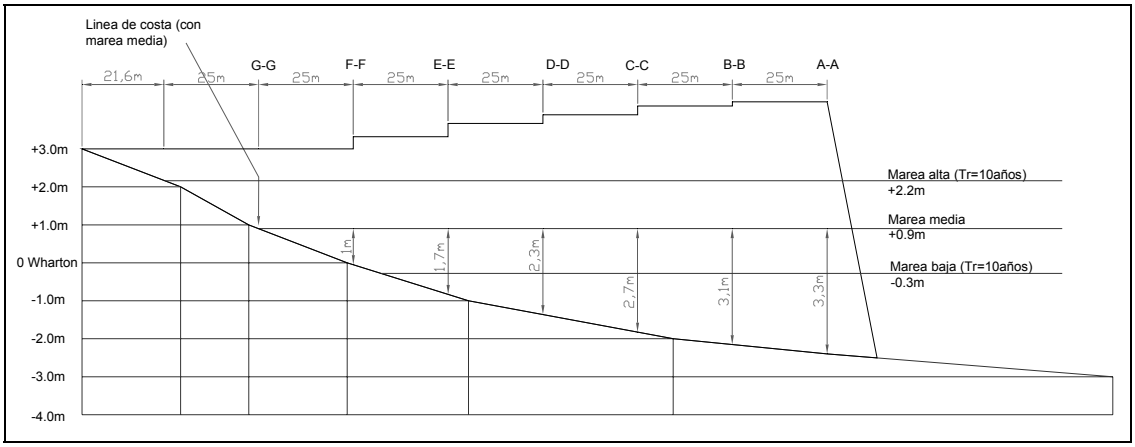


Figura 5.2 – Perfil del espigón sobrepasado

La **tabla 5.4** muestra el tamaño de roca medio, mínimo y máximo de la capa exterior para cada una de las secciones señaladas en la figura 5.2:

Capa exterior						
Sección	**W50 (kg)**	Wmax (kg)	Wmin (kg)	**Dn50 (m)**	Dmax (m)	Dmin (m)
AA	**7460**	9325	5595	**1.42**	1.53	1.29
BB	**6600**	8250	4950	**1.36**	1.47	1.24
CC	**5080**	6350	3810	**1.25**	1.35	1.14
DD	**3810**	4763	2858	**1.14**	1.22	1.03
EE	**2310**	2888	1733	**0.96**	1.04	0.87
FF	**1150**	1438	863	**0.76**	0.82	0.69
GG	**90**	112.5	67.5	**0.33**	0.35	0.30

Tabla 5.4 -

La **tabla 5.5** muestra el tamaño de roca medio, mínimo y máximo de la capa intermedia para las mismas secciones:

Capa intermedia						
Sección	**W50 (kg)**	Wmax (kg)	Wmin (kg)	**Dn50 (m)**	Dmax (m)	Dmin (m)
AA	**746**	970	522	**0.66**	0.72	0.59
BB	**660**	858	462	**0.63**	0.69	0.56
CC	**508**	660	356	**0.58**	0.63	0.52
DD	**381**	495	267	**0.53**	0.58	0.47
EE	**231**	300	162	**0.45**	0.49	0.40
FF	**115**	150	81	**0.35**	0.39	0.31
GG	**9**	12	6	**0.15**	0.17	0.13

Tabla 5.5 -

La **tabla 5.6** muestra el tamaño medio de roca de la protección de pie en cada una de las secciones:

Protección de pie						
Sección	**W50 (kg)**	Wmax (kg)	Wmin (kg)	**Dn50 (m)**	Dmax (m)	Dmin (m)
AA	**1900**	2470	1330	**0.90**	0.98	0.80
BB	**1600**	2080	1120	**0.85**	0.93	0.76
CC	**1100**	1430	770	**0.75**	0.82	0.67
DD	**900**	1170	630	**0.70**	0.77	0.62
EE	**430**	559	301	**0.55**	0.60	0.49
FF	**210**	273	147	**0.43**	0.47	0.38
GG	**30**	39	21	**0.23**	0.25	0.20

Tabla 5.6 -

Dada la granulometría de la arena en la zona del espigón el filtro debe cumplir con los siguientes requisitos:

$$0.28mm<D_{15}<1.56mm$$
$$D_{60}/D_{10}<10$$

Una posible granulometría del filtro se presenta a continuación, sin embargo debe destacarse que cualquier granulometría que cumpla con los requisitos presentados será adecuada.

	mm
D10=	1.0
D15=	1.5
D60=	10.0
D50=	6.6

Tabla 5.7 -

El núcleo se realiza con sobrante de cantera.
El relleno al pie debe tener una granulometría tal que $D_{50} \approx 5mm$

5.6. Diseño final del espigón sumergido

Este diseño corresponde al espigón que se construye desde el agua. El procedimiento constructivo considerado consiste en depositar los materiales en su lugar desde una plataforma flotante. De este modo se evita tener que coronar la estructura por encima del nivel del agua todo a lo largo de su extensión.

Para el cálculo estructural se definen las secciones que se muestran en la figura 5.3. Para cada una de dichas secciones se calcula: tamaño de roca exterior, tamaño de roca intermedia, tamaño de roca en protección de pie, profundidad de la protección contra la socavación. Los resultados obtenidos junto con las características que debe tener el filtro se presentan a continuación. Las piezas gráficas correspondientes a este espigón se encuentran en el **Anexo II**.

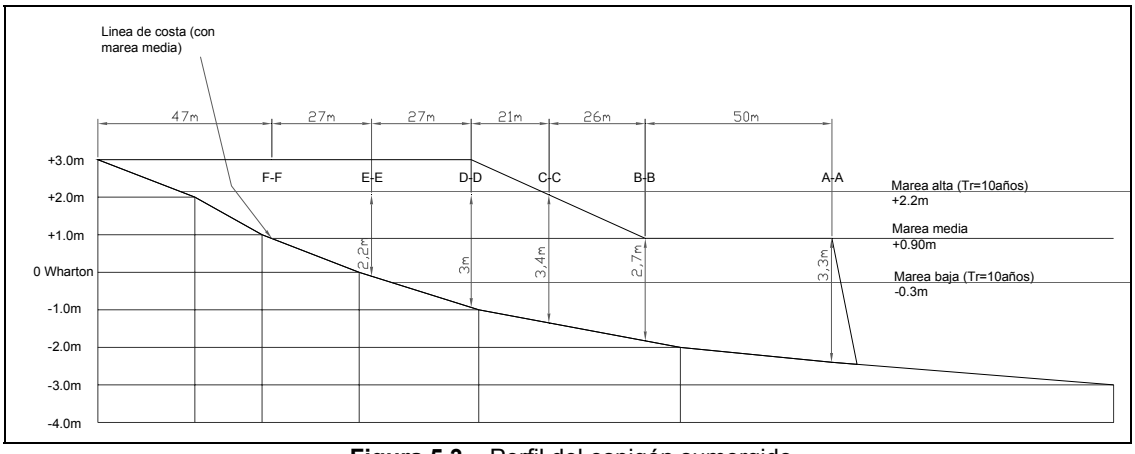


Figura 5.3 – Perfil del espigón sumergido

La **tabla 5.8** muestra el tamaño de roca medio, mínimo y máximo de la capa exterior para cada una de las secciones señaladas en la figura 5.3:

Capa exterior						
Sección	**W50 (kg)**	Wmax (kg)	Wmin (kg)	**Dn50 (m)**	Dmax (m)	Dmin (m)
AA	**2000**	2500	1500	**0.92**	0.99	0.83
BB	**2000**	2500	1500	**0.92**	0.99	0.83
CC	**2000**	2500	1500	**0.92**	0.99	0.83
DD	**2000**	2500	1500	**0.92**	0.99	0.83
EE	**900**	1125	675	**0.70**	0.76	0.64
FF	**90**	113	68	**0.33**	0.35	0.30

Tabla 5.8 -

La **tabla 5.9** muestra el tamaño de roca medio, mínimo y máximo de la capa intermedia para las mismas secciones:

Capa intermedia						
Sección	**W50 (kg)**	Wmax (kg)	Wmin (kg)	**Dn50 (m)**	Dmax (m)	Dmin (m)
AA	**200**	260	140	**0.43**	0.46	0.38
BB	**200**	260	140	**0.43**	0.46	0.38
CC	**200**	260	140	**0.43**	0.46	0.38
DD	**200**	260	140	**0.43**	0.46	0.38
EE	**90**	117	63	**0.33**	0.36	0.29
FF	**9**	12	6	**0.15**	0.17	0.13

Tabla 5.9 -

La **tabla 5.10** muestra el tamaño medio de roca de la protección de pie en cada una de las secciones:

Protección de pie						
Sección	**W50 (kg)**	Wmax (kg)	Wmin (kg)	**Dn50 (m)**	Dmax (m)	Dmin (m)
AA	**1900**	2470	1330	**0.90**	0.98	0.80
BB	**1100**	1430	770	**0.75**	0.82	0.67
CC	**900**	1170	630	**0.70**	0.77	0.62
DD	**430**	559	301	**0.55**	0.60	0.49
EE	**210**	273	147	**0.43**	0.47	0.38
FF	**30**	39	21	**0.23**	0.25	0.20

Tabla 5.10 -

Dada la granulometría de la arena en la zona del espigón el filtro debe cumplir con los siguientes requisitos:

$$0.28mm<D_{15}<1.56mm$$
$$D_{60}/D_{10}<10$$

Una posible granulometría del filtro se presenta a continuación, sin embargo debe destacarse que cualquier granulometría que cumpla con los requisitos presentados será adecuada.

	mm
D10=	1.0
D15=	1.5
D60=	10.0
D50=	6.6

Tabla 5.11 -

El núcleo se realiza con sobrante de cantera.
El relleno al pie debe tener una granulometría tal que $D_{50} \approx 5mm$

5.7. Espigón vertical de hormigón

Un estudio preliminar de las características de la fundación de un espigón vertical lleva a los siguientes requerimientos:

- Altura de la protección de pie por encima del nivel de fundación: 2m
- Profundidad por debajo del nivel de fundación hasta la cual debe continuar la protección de pie para evitar la socavación: -5m
- Peso medio de las rocas requeridas para la protección de pie: 2.5 ton

Todos estos resultados se obtienen siguiendo las recomendaciones del CEM para el cálculo de una estructura vertical. Dichas recomendaciones son de características similares a las utilizadas en el cálculo del espigón de material suelto.

De esto se concluye que en caso de construirse un espigón de tipo vertical, el mismo requeriría para su fundación una estructura de material suelto de tamaño y características similares a las del espigón de material suelto sumergido; presentándose el inconveniente adicional de tener que excavar hasta una profundidad de –5m respecto al nivel de fundación.

Capítulo 6 – Costos

6.1. Introducción

El objetivo de esta sección es obtener una aproximación del costo total de la construcción de cada una de las opciones de espigón propuestas con la finalidad de tener elementos que permitan seleccionar una de dichas opciones. Todos los costos son calculados de forma aproximada y solo dan una idea del orden del costo final de la obra.

Esta sección está dividida en cuatro partes. En la primera, titulada *Espigón sobrepasado*, se estudian los costos asociados a la construcción del espigón desde tierra, lo cual resulta en un espigón sobrepasado. El estudio de costos se hace tanto para el caso en que se use material pétreo para la coraza como para el caso en que se usen bloques de hormigón. En la segunda parte, titulada *Espigón sumergido*, se estudian los costos asociados a la construcción del espigón desde el agua, y al igual que en la primera parte se estudian dos posibilidades: la utilización de material pétreo para la coraza o la construcción de la misma con bloques de hormigón. La tercera parte de esta sección contiene las conclusiones que se desprenden del análisis de costos y la selección de uno de los espigones como recomendación final en función de dichas conclusiones. Finalmente, la cuarta y última parte contiene algunos detalles del procedimiento constructivo de la opción seleccionada que son usados como insumo en las consideraciones ambientales (capítulo 8).

Las fuentes utilizadas para el cálculo de los costos se listan en el Anexo III.

6.2. Espigón sobrepasado

El diseño del espigón sobrepasado está determinado por el hecho de que el mismo debe ser construido desde tierra. La construcción del espigón en este caso se lleva a cabo avanzando desde tierra con maquinaría de movimiento de tierra. Para poder avanzar dicha maquinaría debe trabajar sobre el espigón ya construido.

Dadas sus características una obra como ésta es construida en su totalidad mediante la utilización de maquinaria pesada (en general maquinaria de movimiento de tierra). Esto hace que los costos de mano de obra no asociados a la operación de las máquinas y a la dirección de la obra sean casi despreciables. A su vez, al estar en juego grandes volúmenes de material (el cual prácticamente no debe ser procesado para llegar a formar parte de la obra), los costos están en gran medida determinados por el costo de los materiales y por el costo de utilización de maquinaria (que depende de la duración de la obra).

Visto lo anterior se procede entonces a la definición de dos elementos centrales en el cálculo de los costos en particular: la estimación del volumen de material a utilizar y la estimación de la duración de la obra.

6.2.1. Volumen de material

Los materiales a utilizar son básicamente bloques de roca u hormigón y material tipo piedra partida para el núcleo, el relleno del pie y el filtro. Los volúmenes de material requerido en caso que el espigón sea de roca son:

Volumen de roca en bloques 7650m^3
Volumen de piedra para núcleo, relleno y filtro 2800m^3

En caso que el espigón se construya con bloques de hormigón se calcula el volumen equivalente de hormigón de forma tal que el peso de los bloques sea el mismo que para el caso de roca:

$$V_{Hormigón}=V_{Roca}*(\rho_{Roca}/\rho_{Hormigón})$$

Resulta así para el caso de bloques de hormigón:

Volumen de hormigón para bloques 9000m^3

El volumen de piedra requerido para el núcleo, el relleno y el filtro es similar en ambos casos.

6.2.2. Duración de la obra

La duración de la obra se considera determinada por la velocidad con que la grúa instalada en la punta del espigón puede colocar las rocas (ya sean de hormigón o de material pétreo), por lo tanto es esencial tener una estimación del número de rocas a ser colocadas con grúa. Se considera que la grúa deberá colocar todas aquellas rocas con peso mayor a 100kg. El número total de rocas de peso mayor a 100kg es:

Número de rocas a colocar con grúa 17500 rocas

Considerando que en promedio una grúa de 45 ton al pie puede mover un bloque desde un camión que se encuentra a su lado hasta su lugar final en el espigón en aproximadamente 2min, la duración de la obra es de aproximadamente 3 meses. A esto se le debe agregar aquellos días en que no se podrá trabajar debido a condiciones meteorológicas adversas por lo que la duración de la obra se estima en:

Duración estimada de la obra 4 meses

6.2.3. Costos espigón sobrepasado de roca

El costo total en este caso es aproximadamente:

Costo es espigón de roca 1.303.000 U$S

Los detalles del cálculo de costos se presentan a continuación:

Rubro	Costo (U$S/un)	Unidad	Cant	Costo total (U$S)	Comentario
Roca en cantera	26,00	m3	7650	198.900,00	
Transporte roca	0,17	m3km	516375	87.783,75	
Grúa 45ton c/grapo carga	20.000,00	mes	4	80.000,00	Carga de las rocas en cantera
Grúa 45ton c/grapo descarga	20.000,00	mes	4	80.000,00	Descarga de las rocas en la obra
Material suelto en cantera	15,00	m3	2800	42.000,00	
Transporte mat. Suelto	0,17	m3km	126000	21.420,00	
Carga y descarga mat. suelto	180,00	hrs	38	6.840,00	
Tosca para camino	2,10	m3	1000	2.100,00	
Transporte tosca	0,17	m3km	45000	7.650,00	
Carga y descarga tosca	180,00	hrs	14	2.442,86	
Dragado	3,00	m3	4000	12.000,00	
Pala carg. nucleo y tosca	180,00	hrs	768	138.240,00	
Camiones en obra	100,00	hrs	1536	153.600,00	2 camiones en obra
Grúa en obra p/acopio	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua para cargar los camiones
Grúa en obra p/colocar	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua en la punta del espigón
Ingeniero	2.083,33	mes	4	8.333,33	1 ingeniero
Capataz	1.041,67	mes	4	4.166,67	1 capataz
Peones	1,67	hr peon	3072	5.120,00	4 peones
Alojamiento	500,00	mes casa	12	6.000,00	3 casas
Camioneta	1.458,33	mes cam	8	11.666,67	2 camionetas
Implantación	25.000,00	G	1	25.000,00	
Retiro	25.000,00	G	1	25.000,00	
Costo fijos	3%	G	-	32.347,90	
Extras, imprevistos, otros	2%	G	-	22.212,22	
Beneficio estimado	15%	G	-	169.923,51	
TOTAL				**1.302.747**	

Tabla 6.1 – Costos asociados al espigón sobrepasado construido con bloques de material pétreo

En las tablas siguientes se detalla la incidencia de los materiales, los equipos, los gastos globales y de mano de obra y de los gastos asociados a la empresa constructora en el costo total de la obra:

Equipos c/MO	
Camiones en obra	153.600
Pala carg. nucleo y tosca	138.240
Transporte roca	87.784
Grúa 45ton c/grapo carga	80.000
Grúa 45ton c/grapo descarga	80.000
Grúa en obra p/acopio	80.000
Grúa en obra p/colocar	80.000
Transporte mat. Suelto	21.420
Dragado	12.000
Transporte tosca	7.650
Carga y descarga mat. suelto	6.840
Carga y descarga tosca	2.443
Total=	**458.137**
	48%

Materiales	
Roca en cantera	198.900
Material suelto en cantera	42.000
Tosca para camino	2.100
Total=	**243.000**
	25%

Globales y MO	
Implantación	25.000
Retiro	25.000
Extras, imprevistos, otros	22.212
Camioneta	11.667
Ingeniero	8.333
Alojamiento	6.000
Peones	5.120
Capataz	4.167
Total=	**57.499**
	6%

Empresa	
Beneficio estimado	169.924
Costo fijos	32.348
Total=	**202.271**
	21%

Tabla 6.2 – Costos asociados al espigón sobrepasado construido con bloques de material pétreo. Desglose por rubros.

6.2.4. Costos espigón sobrepasado de bloques de hormigón

El costo total en este caso es aproximadamente:

Costo es espigón de bloques de hormigón 1.881.000 U$S

Los detalles del cálculo de costos se presentan a continuación:

Rubro	Costo (U$S/un)	Unidad	Cant	Costo total (U$S)	Comentario
Hormigón	83,33	m3	9000	750.000,00	
Planta de horm 200m3/dia	30.000,00	mes	2,25	67.500,00	
Encofrados	3,47	m2	18000	62.500,00	
M.O. encofrado y hormig	3,33	horas	13500	45.000,00	
Material suelto en cantera	15,00	m3	2800	42.000,00	
Transporte mat. suelto	0,17	m3km	1E+05	21.420,00	
Carga y descarga mat. suelto	180,00	hrs	38	6.840,00	
Tosca para camino	2,10	m3	1000	2.100,00	
Transporte tosca	0,17	m3km	45000	7.650,00	
Carga y descarga tosca	180,00	hrs	14	2.442,86	
Dragado	3,00	m3	4000	12.000,00	
Pala carg. nucleo y tosca	180,00	hrs	768	138.240,00	
Camiones en obra	100,00	hrs	1536	153.600,00	2 camiones en obra
Grúa en obra p/acopio	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua para cargar los camiones
Grúa en obra p/colocar	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua en la punta del espigón
Ingeniero	2.083,33	mes	4	8.333,33	1 ingeniero
Capataz	1.041,67	mes	4	4.166,67	1 capataz
Peones	1,67	hr peon	3072	5.120,00	4 peones
Alojamiento	500,00	mes casa	12	6.000,00	3 casas
Camioneta	1.458,33	mes cam	8	11.666,67	2 camionetas
Implantación	25.000,00	G	1	25.000,00	
Retiro	25.000,00	G	1	25.000,00	
Costo fijos	3%	G	-	46.697,39	
Extras, imprevistos, otros	2%	G	-	32.065,54	
Beneficio estimado	15%	G	-	245.301,37	
TOTAL				**1.880.644**	

Tabla 6.3 – Costos asociados al espigón sobrepasado construido con bloques de hormigón

En las tablas siguientes se detalla la incidencia de los materiales, los equipos, los gastos globales y de mano de obra y de los gastos asociados a la empresa constructora en el costo total de la obra:

Equipos c/MO	
Camiones en obra	153.600
Pala carg. nucleo y tosca	138.240
Grúa en obra p/acopio	80.000
Grúa en obra p/colocar	80.000
Planta de horm 200m3/dia	67.500
Transporte mat. suelto	21.420
Dragado	12.000
Transporte tosca	7.650
Carga y descarga mat. suelto	6.840
Carga y descarga tosca	2.443
Total=	**552.760**
	30%

Globales y MO	
M.O. encofrado y hormig	45.000
Extras, imprevistos, otros	32.066
Implantación	25.000
Retiro	25.000
Camioneta	11.667
Ingeniero	8.333
Alojamiento	6.000
Peones	5.120
Capataz	4.167
Total=	**162.352**
	9%

Materiales	
Hormigón	750.000
Encofrados	62.500
Material suelto en cantera	42.000
Tosca para camino	2.100
Total=	**856.600**
	46%

Empresa	
Beneficio estimado	245.301
Costo fijos	46.697
Total=	**291.999**
	16%

Tabla 6.4 – Costos asociados al espigón sobrepasado construido con bloques de hormigón. Desglose por rubros.

6.3. Espigón sumergido

6.3.1. Volumen de material

Al igual que en el caso del espigón sobrepasado los materiales a utilizar son básicamente bloques de roca u hormigón y material tipo piedra partida para el relleno del pie. Los volúmenes de material requerido en caso que el espigón sea de roca son:

Volumen de roca en bloques 4200m^3
Volumen de piedra para núcleo y relleno 950m^3

Aplicando la misma corrección que se utilizó en el caso del espigón sobrepasado el volumen de hormigón requerido en caso de que se utilicen bloques de dicho material es:

Volumen de hormigón para bloques 4900m^3

El volumen de piedra para el relleno es similar en ambos casos.

6.3.2. Duración de la obra

El número de rocas en este caso es similar al caso del espigón sobrepasado, aunque ahora las mismas son de menor tamaño, siendo el tamaño máximo de aproximadamente 1m de lado. Esto lleva a que los tiempos de carga y descarga con grúa se vean disminuidos, y por lo tanto disminuya la duración de la obra. Sin embargo en este caso se deben agregar los traslados de las cargas y descargas de las balsas y el hecho de que la grúa deberá tomar las rocas desde dichas balsas con las complicaciones adicionales que esto implica en caso de que exista agitación del mar. Para estimar el costo en este caso se supondrá que los elementos mencionados se compensan y que por lo tanto la duración de la obra en este caso es similar a la del caso anterior:

Duración estimada de la obra 4 meses

6.3.3. Costos espigón sumergido de roca

El costo total en este caso es aproximadamente:

Costo es espigón de roca 1.485.000 U$S

Los detalles del cálculo de costos se presentan a continuación:

Rubro	Costo (U$S/un)	Unidad	Cant	Costo total (U$S)	Comentario
Roca en cantera	26,00	m3	4200	109.200,00	
Transporte roca	0,17	m3km	283500	48.195,00	
Grúa 45ton c/grapo carga	20.000,00	mes	4	80.000,00	Carga de las rocas en cantera
Grúa 45ton c/grapo descarga	20.000,00	mes	4	80.000,00	Descarga de las rocas en la obra
Transporte ponton		G	-	200.000,00	
Material suelto en cantera	15,00	m3	1700	25.500,00	
Transporte mat. suelto	0,17	m3km	76500	13.005,00	
Carga y descarga mat. suelto	180,00	hrs	23	4.152,86	
Pala cargadora	180,00	hrs	768	138.240,00	
Camiones en obra	100,00	hrs	1536	153.600,00	2 camiones en obra
Grúa en obra p/acopio	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua para cargar los camiones
Grúa en obra p/colocar	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua en la punta del espigón
Dragado	3,00	m3	4000	12.000,00	
Alquiler pontón	30.000,00	mes	4	120.000,00	
Ingeniero	2.083,33	mes	4	8.333,33	1 ingeniero
Capataz	1.041,67	mes	4	4.166,67	1 capataz
Peones	1,67	hr peon	3072	5.120,00	4 peones
Alojamiento	500,00	mes casa	12	6.000,00	3 casas
Camioneta	1.458,33	mes cam	8	11.666,67	2 camionetas
Implantación	25.000,00	G	1	25.000,00	
Retiro	25.000,00	G	1	25.000,00	
Costo fijos	3%	G	-	36.875,39	
Extras, imprevistos, otros	2%	G	-	25.321,10	
Beneficio estimado	15%	G	-	193.706,40	
TOTAL				**1.485.082**	

Tabla 6.5 – Costos asociados al espigón sumergido construido con bloques de material pétreo

En las tablas siguientes se detalla la incidencia de los materiales, los equipos, los gastos globales y de mano de obra y de los gastos asociados a la empresa constructora en el costo total de la obra:

Equipos c/MO	
Transporte ponton	200.000
Camiones en obra	153.600
Pala cargadora	138.240
Alquiler ponton	120.000
Transporte roca	48.195
Grúa 45ton c/grapo carga	80.000
Grúa 45ton c/grapo descarga	80.000
Grúa en obra p/acopio	80.000
Grúa en obra p/colocar	80.000
Transporte mat. suelto	13.005
Dragado	12.000
Carga y descarga mat. suelto	4.153
Total=	**1.009.193**
	68%

Globales y MO	
Extras, imprevistos, otros	25.321
Implantación	25.000
Retiro	25.000
Camioneta	11.667
Ingeniero	8.333
Alojamiento	6.000
Peones	5.120
Capataz	4.167
Total=	**110.608**
	7%

Empresa	
Beneficio estimado	193.706
Costo fijos	36.875
Total=	**230.582**
	16%

Materiales	
Roca en cantera	109.200
Material suelto en cantera	25.500
Total=	**134.700**
	9%

Tabla 6.6 – Costos asociados al espigón sumergido construido con bloques de material pétreo. Desglose por rubros.

6.3.4. Costos espigón sumergido de bloques de hormigón

El costo total en este caso es aproximadamente:

Costo es espigón de bloques de hormigón 1.710.000 U$S

Los detalles del cálculo de costos se presentan a continuación:

Rubro	Costo (U$S/un)	Unidad	Cant	Costo total (U$S)	Comentario
Hormigón	83,33	m3	4900	408.333,33	
Planta de horm 200m3/dia	30.000,00	mes	1,225	36.750,00	
Encofrados	3,47	m2	9800	34.027,78	
M.O. encofrado y hormig	3,33	horas	7350	24.500,00	
Transporte ponton		G	-	200.000,00	
Material suelto en cantera	15,00	m3	1700	25.500,00	
Transporte mat. suelto	0,17	m3km	76500	13.005,00	
Carga y descarga mat. suelto	180,00	hrs	23	4.152,86	
Pala cargadora	180,00	hrs	768	138.240,00	
Camiones en obra	100,00	hrs	1536	153.600,00	2 camiones en obra
Grúa en obra p/acopio	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua para cargar los camiones
Grúa en obra p/colocar	20.000,00	mes	4	80.000,00	Grua en la punta del espigón
Dragado	3,00	m3	4000	12.000,00	
Alquiler pontón	30.000,00	mes	4	120.000,00	
Ingeniero	2.083,33	mes	4	8.333,33	1 ingeniero
Capataz	1.041,67	mes	4	4.166,67	1 capataz
Peones	1,67	hr peon	3072	5.120,00	4 peones
Alojamiento	500,00	mes casa	12	6.000,00	3 casas
Camioneta	1.458,33	mes cam	8	11.666,67	2 camionetas
Implantación	25.000,00	G	1	25.000,00	
Retiro	25.000,00	G	1	25.000,00	
Costo fijos	3%	G	-	42.461,87	
Extras, imprevistos, otros	2%	G	-	29.157,15	
Beneficio estimado	15%	G	-	223.052,20	
TOTAL				**1.710.067**	

Tabla 6.7 – Costos asociados al espigón sumergido construido con bloques de hormigón

En las tablas siguientes se detalla la incidencia de los materiales, los equipos, los gastos globales y de mano de obra y de los gastos asociados a la empresa constructora en el costo total de la obra:

Equipos c/MO	
Transporte ponton	200.000
Camiones en obra	153.600
Pala cargadora	138.240
Alquiler ponton	120.000
Grúa en obra p/acopio	80.000
Grúa en obra p/colocar	80.000
Planta de horm 200m3/dia	36.750
Transporte mat. suelto	13.005
Dragado	12.000
Carga y descarga mat. suelto	4.153
Total=	**837.748**
	49%

Materiales	
Hormigón	408.333
Encofrados	34.028
Material suelto en cantera	25.500
Total=	**467.861**
	27%

Globales y MO	
Extras, imprevistos, otros	29.157
Implantación	25.000
Retiro	25.000
M.O. encofrado y hormig	24.500
Camioneta	11.667
Ingeniero	8.333
Alojamiento	6.000
Peones	5.120
Capataz	4.167
Total=	**138.944**
	8%

Empresa	
Beneficio estimado	223.052
Costo fijos	42.462
Total=	**265.514**
	16%

Tabla 6.8 – Costos asociados al espigón sumergido construido con bloques de hormigón. Desglose por rubros.

6.4. Selección de una alternativa

La tabla siguiente muestra los costos totales de cada una de las opciones presentadas:

Sobrepasado de roca	1.303.000 U$S
Sobrepasado de bloque de hormigón	1.881.000 U$S
Sumergido de roca	1.485.000 U$S
Sumergido de bloque de hormigón	1.710.000 U$S

Tabla 6.9 – Costos asociados a cada una de las alternativas presentadas

Claramente las opciones que utilizan material pétreo para la coraza (espigón sobrepasado de roca y espigón sumergido de roca) son más económicas que aquellas que utilizan bloques de hormigón.

Dentro de las opciones que utilizan material pétreo, la de construir el espigón desde tierra resulta ser aproximadamente 14% más económica que la que se construye desde el agua (la diferencia es aproximadamente 180.000 U$S) por lo cual resulta aconsejable la construcción del espigón desde tierra.

A su vez el espigón sobrepasado requiere equipos y metodologías menos especializadas, lo cual amplía el espectro de empresas constructoras que pueden presentarse a la licitación, generando así una mayor puja por la adjudicación de la obra lo cual en general conduce a un mayor ajuste de los costos por parte de las empresas.

La recomendación final es por lo tanto la construcción del espigón sobrepasado de roca, cuyo costo final es aproximadamente: 1.300.000,00 U$S.

6.5. Descripción del proceso constructivo de la alternativa seleccionada

En esta sección se realiza una descripción más detallada del método constructivo propuesto para la alternativa seleccionada (espigón sobrepasado). Debe tenerse en cuenta que este procedimiento constructivo es solo uno de los muchos posibles y no necesariamente tiene por qué ser el que se termine utilizando para la ejecución de la obra. El objetivo principal de esta sección es disponer de un escenario de la etapa de construcción que permita el desarrollo de las consideraciones ambientales pertinentes.

La obra se lleva a cabo en aproximadamente ***4 meses***. Durante este tiempo ***la obra tiene un avance continuo, y de intensidad constante*** (no presenta temporadas de trabajo más intenso que otras), en 3 frentes:

a) Transporte de materiales al obrador y acopio de los mismos
b) Transporte de materiales al espigón, donde serán utilizados
c) Construcción del espigón propiamente dicho

A continuación se describe cada frente con mayor detalle:

a) El transporte de los materiales requiere de la ejecución de aproximadamente 690.000m^3km. Dado que cada camión carga 10m^3 esto implica aproximadamente 69.000 km y considerando que cada viaje desde la cantera es un recorrido de aproximadamente 45km, se requieren aproximadamente 1500 viajes en 4 meses. Para completar los 1500 viajes en cuatro meses, sin trabajar sábados y domingos, se deben realizar aproximadamente 19 viajes por día. Si cada viaje de ida y vuelta (incluida carga y descarga) lleva aproximadamente 1½ horas entonces cada camión puede realizar hasta 6 viajes por día y por lo tanto se requiere una flota de 4 camiones para el transporte de los materiales. En conclusión se utilizarán 4 camiones realizando cada uno aproximadamente 6 viajes diario de lunes a viernes durante 4 meses. Adicionalmente para la carga y descarga de los materiales se requiere una grúa y de una pala cargadora en la cantera y una grúa y una pala cargadora en el obrador.

Para el acopio de los materiales el espacio necesario será mínimo dado que estos se irán utilizando a medida que llegan a la obra. Para tener un estimativo se puede pensar en un tiempo de residencia de los materiales en el obrador de una semana. Esto equivale a tener un acopio de aproximadamente 700m^3. Si los mismos se acopian con una altura de 2m entonces se requieren para acopio aproximadamente 350m^2 en la zona de obrador.

b) Una vez que los materiales ya están disponibles en obra los mismos se cargan en los camiones de uso interno de la obra para ser transportados desde la zona de obrador hasta el espigón. La carga de los materiales requiere de una grúa y una pala cargadora que siempre deberán estar disponibles a tales efectos. En la obra se dispondrá de dos camiones para hacer el recorrido desde el obrador hasta el espigón. Dicho recorrido es de aproximadamente 200m.

c) Los materiales que son transportados hasta el espigón por los dos camiones de uso interno de la obra son volcados por los mismos en el caso del núcleo o son colocados en sitio por la grúa en caso de que sean rocas de mayor porte. Para esto se debe tener una grúa siempre en el espigón.

Resumiendo, los equipos que se requieren en obra son:

- 3 grúas
- 2 palas cargadoras
- 2 camiones de uso interno
- 4 camiones para transporte de material desde cantera

A su vez se puede decir que el obrador deberá disponer de:

- Aproximadamente 350m^2 para acopio de materiales más otros 200m^2 para carga y descarga de los mismos (total 550m^2)
- Espacio suficiente para alojar los equipos mencionados anteriormente (total 350m^2)
- Demás instalaciones de una obrador (comedor, baño, oficina), total 100m^2

Área total del obrador estimada: 1000m^2

Capítulo 7 - Gestión y mantenimiento del espigón

7.1. Introducción

Hacer un espigón de material suelto tiene la ventaja de aceptar un riesgo muy bajo de tener un daño catastrófico. Esto se debe a que, al no tener hiperestaticidad alguna, cualquier falla que tenga el espigón no repercutirá mayormente en otras secciones, y solo comenzará a fallar puntualmente donde se suscitó el problema.

Si bien el hecho de no esperar un daño catastrófico es una ventaja, la posibilidad de tener fallas puntuales por movimiento de las rocas que componen la coraza requiere la necesidad de mantenimientos periódicos.

Por otra parte, como fue visto en el capítulo 4, es esperable que a largo plazo la línea de costa en las cercanías del espigón avance por acumulación de sedimentos producto de transporte litoral. Este avance de la línea de costa significa un engrosamiento del ancho de playa, efecto considerado como positivo tanto por atenuar el retroceso que hoy en día evidencia la línea de costa (manteniendo el hábitat de muchas especies que habitan en esa zona) como por las connotaciones que trae para la industria turística tener una playa más ancha.

Sin embargo el avance de la línea de costa significa también un avance de la línea de rompiente. Debido a que el espigón fue dimensionado para cubrir toda la zona de rompiente (ya que es en esa zona donde se dan principalmente las corrientes litorales), cuando esto no suceda se observará una baja en la efectividad de retención, introduciéndose nuevamente sedimentos al puerto.

7.2. Objetivo

El objetivo de este capítulo es plantear los aspectos generales de un plan de gestión y mantenimiento para mantener al espigón en las condiciones para las que fue dimensionado; esto es, impedir el ingreso de sedimentos al puerto.

Este plan está enfocado en dos aspectos fundamentales: la determinación de cuándo y cómo reparar o rehabilitar el espigón y de cuándo y cómo proceder al vaciado por dragados de la arena acumulada contra el espigón.

7.3. Mantenimiento de la línea de costa

El mantenimiento de la línea de costa consiste en dragar la arena que se deposita en el espigón toda vez que se constate que está ingresando arena al puerto. Según fue descrito en el capítulo 4, es esperable que esta operación se tenga que llevar a cabo con una periodicidad aproximada de 10 años (ver sección 4.9).

Por otra parte, es razonable suponer que la arena depositada en el espigón tenga una calidad semejante a la que presenta la arena de las playas contiguas (a no ser que aparezca una fuente puntual de contaminación en las inmediaciones del espigón hoy en día inexistente). Por lo tanto, esta arena puede no ser sacada del sistema de costa La Paloma-La Pedrera, realizando su disposición final en alguna de las playas aledañas. Actualmente, la arena que ingresa al puerto tiene contacto tanto con la actividad propia de un puerto como con ciertos vertimientos producidos por las industrias allí presentes. Esto hace que su calidad cambie, no siendo recomendable a priori reinsertarla al sistema costero y por lo tanto perdiéndola, ayudando al retroceso de la línea de costa (ver capítulo 3.6.7).

7.3.1. Sitio elegido para la disposición final

Debido a que la arena retenida en el espigón tendrá una granulometría muy fina (explicada por la baja energía de oleaje presente en la zona y constatado a partir de muestras tomadas por el grupo de proyecto y muestras tomadas de informes del MTOP, ver capítulo 2), se recomienda que ésta sea dispuesta en una playa que reciba una energía de oleaje similar. De disponerse esta arena dragada en una playa que reciba una energía de oleaje superior será fácilmente transportada, corriendo el riesgo de no quedar disponible al salir del sistema. A su vez, lo ideal sería disponerla en un lugar relativamente lejos del espigón, de manera que estos sedimentos no vuelvan inmediatamente a éste, generando los mismos problemas de ingreso de arena al puerto en el corto plazo.

Teniendo en cuenta que la energía de oleaje aumenta conforme nos alejamos del espigón no es sencillo cumplir con los dos requerimientos establecidos anteriormente, teniendo que elegir un punto intermedio en el cual la energía de oleaje sea similar a la presente en la playa donde se construirá el espigón y que a su vez no quede demasiado cerca de éste. La playa elegida que cumple razonablemente con estas dos condiciones es la playa de La Aguada. La misma queda a la sombra de la escollera del puerto si se toma como ola incidente la ola predominante definida en la sección 3.6.4, teniendo la ventaja extra de ser una playa con un gran atractivo turístico, por lo que un engrosamiento en su ancho sería favorable desde este punto de vista (ver lámina 4 adjunta al proyecto).

7.3.2. Metodología de disposición

La disposición final de la arena dragada no necesariamente tiene que ser en la playa seca. Basta con que ésta sea depositada en cualquier lugar entre la berma y la profundidad de cierre de la playa para que quede disponible para ser transportada mediante corriente transversal y así depositarse en la playa engrosándola.

A su vez, debido a que la calidad de la arena depositada en el espigón se supone similar a la existente en la playa de La Aguada, se recomienda realizar la disposición final tratando de lograr una capa constante y de poco espesor de manera de reducir los impactos ambientales (ver sección 8.3.2).

Se calcula que cuando el espigón esté siendo sobrepasado se deberán dragar aproximadamente unos 130.000m^3 de arena; los cuales podrán ser dispuestos en una franja de 650m de costa, entre la berma (cota +3m respecto al cero Wharton) y una profundidad aproximada de -5m respecto al cero Wharton (250m aguas adentro respecto a la línea de costa). Esto produce un avance aproximado de la línea de costa de 25m. El espesor de la capa de arena a disponer resulta entonces de aproximadamente 0.75m (ver figura 7.1).

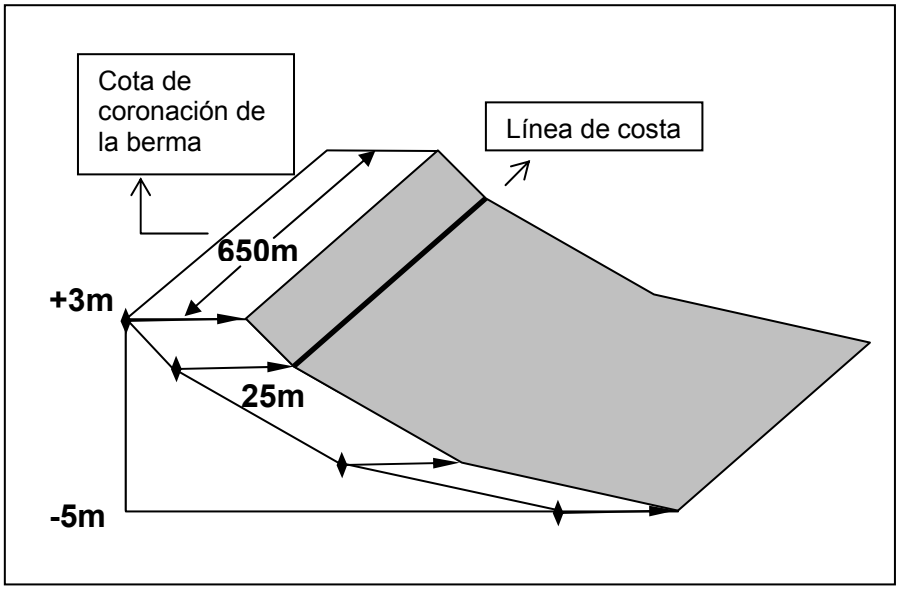


Figura 7.1 – Esquema de disposición de la arena de dragado

7.4. Reparación y rehabilitación del espigón

7.4.1. Consideraciones generales

Como se mencionó anteriormente la flexibilidad estructural que presenta el espigón hace que sea poco probable un colapso total de la estructura. En cambio sí resulta más probable que se produzcan cierto tipo de deterioro paulatino, como por ejemplo pequeños desplazamientos de los elementos de la coraza, socavación o pérdida de elementos del núcleo. De no ser tratados a tiempo estos deterioros, que suelen presentarse de forma incipiente en un principio, pueden llevar a daños más importantes llegando a comprometer la integridad estructural o funcional del espigón. Aún sin llegar a estos extremos una vez que el deterioro ha avanzado suele ser mucho más difícil y costoso de reparar.

Otro aspecto de gran importancia es definir los motivos del deterioro o falla antes de proceder a la reparación. Los mismos pueden ser:

- Error en el diseño estructural
- Error en la fase de construcción
- Error en la estimación de parámetros de diseño
- Ocurrencia de un evento más severo que el de diseño

En el diseño del espigón (presentado en el capítulo 5) se han seguido todas las indicaciones del CEM por lo que es poco probable que puedan presentarse errores de diseño. A pesar de esto, gran parte de los métodos utilizados tienen una fuerte componente empírica, por lo que están sujetos a correcciones y errores. En este sentido alguna de las recomendaciones o coeficientes empíricos utilizados y que hoy son tomadas como válidos en un futuro puede que sean corregidos por subestimar alguna variable del proyecto.

La detección de algún error en los métodos constructivos utilizados en la implementación de los mismos no solo sirve para adjudicar responsabilidades, sino que también sirve para no cometer los mismos errores al reparar o rehabilitar la estructura.

Una subestimación en los parámetros de diseño (en particular en la altura de ola) implica que el diseño no es adecuado a las solicitaciones del entorno, por lo que sustituir los elementos de la protección por otros de similar tamaño sólo hará que el problema vuelva a presentarse en un futuro cercano. En caso de producirse un fallo por esta causa sería necesario hacer un rediseño de la estructura con mejores fuentes de datos que los disponibles en el diseño original. En este caso en particular la ola de diseño está limitada por profundidad (ver sección 5.2). Dado que se dispone de una serie histórica de datos de nivel de mar de buena calidad y tomados en sitio, es poco probable que la ola de diseño esté subestimada.

Otro motivo de deterioro de la estructura puede ser la variabilidad propia y natural del oleaje incidente y del nivel del mar. Aún en el caso de haber estimado los parámetros de diseño de forma aceptable y de haber realizado la

obra y el diseño del espigón de buena manera, es probable que a lo largo de la vida útil del proyecto ocurran ciertos fenómenos climáticos que hagan que la ola de diseño sea superada. El riesgo de ocurrencia de eventos más severos que el de diseño y el período de tiempo entre reparaciones para cada riesgo se presentan en la tabla siguiente.

Nº de eventos con tiempo de retorno mayor a 10años	Probabilidad de que ocurran en 20 años
0	12%
1	27%
2	29%
3	19%
4	9%

Probabilidad de tener 2 o menos eventos más severos que el de diseño en 20 años	Intervalo de tiempo entre reparaciones asociado
87%	10 años

Probabilidad de tener 4 o menos eventos más severos que el de diseño en 20 años	Intervalo de tiempo entre reparaciones asociado
96%	5 años

Tabla 7.1 – Riesgo de ocurrencia de eventos con tiempo de retorno mayor a 10 años en un período de 20 años

La ocurrencia de un evento de mayor severidad que el de diseño solo debería producir daños parciales a la estructura y siempre debe ser tenido en cuenta como un posible causante de fallos. Por otro lado siempre es posible la ocurrencia de accidentes, como por ejemplo el choque de una embarcación. En particular este hecho, si bien poco probable, podría producir daños severos a la estructura.

7.4.2. Tipos de reparación

Independientemente del motivo que la origine las posibles reparaciones a efectuarse pueden clasificarse según el elemento funcional a reparar. Estos son la coraza, el pie de protección o el núcleo.

7.4.2.1. Reparación de coraza y capas inferiores

Si el desplazamiento de la sección es menor que el 5% puede considerarse que se está ante un daño puntual. En este caso puede procederse a la sustitución de la unidad o unidades de la coraza dañadas o desplazadas. Éste es el tipo de reparación más probable y también el menos costoso, ya que los tiempos de reparación, y por tanto de alquiler de maquinaria, etc, es menor. Por otro lado la cantidad de unidades necesarias para la reparación es relativamente baja, lo que también hace que los costos sean menores.

Para proceder a la reparación deberá llegarse a la zona afectada con el brazo de una grúa similar a la utilizada en la construcción. Para esto se recomienda avanzar desde la playa rellenando desde tierra con arena. También podría alquilarse un pontón para montar la grúa sobre el mismo o desarmar la coraza para llegar por encima del morro. Dado el probable avance de la playa y

dependiendo de la cercanía de la sección afectada, la primer alternativa resultaría mucho menos costosa. Además al desmantelarse la parte superior para acceder por encima de la estructura se estaría exponiendo a la misma a la acción de las olas sin la protección superior que aportan los elementos de la coraza. Por otro lado redisponer todos los elementos superiores de la coraza dándoles una buena traba con los elementos ya existentes y sin afectar la pendiente ya construida puede ser algo muy dificultoso.

Independientemente del método de reparación es importante que los nuevos elementos a agregar tengan una buena traba con los ya existentes, para esto debe tenerse especial cuidado al colocarlos.

Si bien es poco probable que la cantera de la que provienen las rocas se agote, puede ser conveniente estoquear algunos elementos en la fase de construcción para asegurar disponibilidad en el momento de la reparación.

Si el daño en alguna sección es superior al 5% ya no pude decirse que se esté en presencia de un daño puntual. En este caso toda una sección del espigón ha sido afectada. Tanto el movimiento progresivo o repentino de varios elementos de la coraza como una falla del pie o la pérdida de material de capas inferiores pueden ser las causantes. En este caso resulta especialmente importante determinar el causante de la misma. De ser por falta de estabilidad de la coraza se recomienda cubrir la capa existente con una nueva. Para esto deberá redefinirse el tamaño de los elementos, la nueva pendiente, el número de capas y el tamaño del pie de la nueva sección. Si bien la sustitución de los elementos existentes es una alternativa, ésta sería más costosa que simplemente agregar una capa por encima.

7.4.2.2. Reparación del pie

Si el daño es menor y se ha dado por superación de la ola de diseño se puede proceder simplemente a la adición de más elementos del mismo tamaño. Si por el contrario el daño se produce por debajo de las condiciones de diseño puede ser recomendable agregar unidades de mayor peso sobre las ya existentes. Solo en caso de que el daño sea realmente importante y se requiera el rediseño del espigón se justificaría el retiro de los elementos removidos, ya que esto podría afectar la estabilidad de la coraza en el momento de la reparación, además de acarrear un costo extra.

Otra causa de daño en el pie es la socavación de corrientes de retorno adyacentes al espigón. En este caso también pueden adicionarse elementos de mayor tamaño al pie. Cabe aclarar que un daño de estas características es poco probable ya tanto la longitud como los materiales utilizados hacen que las corrientes originadas sean de poca intensidad en lo que a esto respecta. Por otro lado se han tomado todas las precauciones para evitar socavaciones, en particular se ha dispuesto un manto de protección a estos fines.

7.4.2.3. Llenado de núcleo y reducción de la permeabilidad

Es posible que un desacomodamiento de la coraza permita que parte de los materiales del núcleo se pierdan, aumentando la permeabilidad del espigón. En este caso parte de la arena retenida por el espigón comenzará a traspasarlo para acumularse dentro del puerto y por lo tanto el espigón no estará cumpliendo cabalmente con el fin para el que fue construido. El modo de reparación recomendado consiste en el llenado de los agujeros con algún tipo de sellante. (CEM 1110-2-1100 (Part VI) 28 Feb 05). El costo de este mantenimiento debe ser contrastado con el costo de dragar esa arena del puerto, ya que esto puede ser más barato en caso de que la arena que traspasa sea escasa (puede ser por ejemplo que convenga incluir este volumen en el dragado de mantenimiento del canal de acceso del puerto).

7.5. Plan de monitoreo y control

Como se ha mencionado anteriormente una buen gestión del espigón implica reparar en su primera fase de deterioro para no permitir que se llegue a etapas más evolucionadas. En este sentido es importante la decisión de cuándo reparar. Como criterio general debe procederse a la reparación del espigón si:

- se constata que el mismo ha sufrido un deterioro que podría poner en peligro su funcionalidad o estabilidad estructural
- se aprecia un deterioro incipiente pero continuo que indique una subestimación de los parámetros de diseño
- se percibe un transporte de sedimentos a través o por delante del espigón

De cualquier forma la decisión final de cuándo se está ante una de estas situaciones quedará a criterio de quien esté a cargo de la gestión del espigón.

Por otro lado otras decisiones igualmente importantes son cuándo dragar el puerto y el espigón para su vaciado.

La información de base para tomar estas decisiones (cuándo dragar y cuándo reparar) surgen del monitoreo de la estructura y del monitoreo de funcionamiento que se describe en las secciones siguientes.

7.5.1. Monitoreo de la estructura

Se realizarán inspecciones periódicas con el fin de constatar cualquier tipo de anomalía en los elementos de la coraza, la estructura o alguna sección. Las mismas consistirán simplemente en inspecciones visuales. Ante la presencia de unidades dañadas o movidas se procederá al marcado de las mismas, a contarlas y de ser posible a la medición mediante cinta y nivel de las distancias movidas. También puede ser útil comparar fotos tomadas desde un mismo punto en tierra o fotos aéreas. Para esto pueden contratarse vuelos periódicos o conseguir fotos tomadas para otros fines (por ejemplo monitoreo de avance de costa).

Si en una de estas inspecciones se presume que el espigón ha aumentado su permeabilidad puede procederse a un método sencillo y barato. El mismo consiste en dejar caer una mancha de tinta del lado norte del espigón. Si la misma demora menos de un minuto en atravesarlo se estará ante un problema de permeabilidad del mismo.

De estas inspecciones debe surgir información cualitativa y en lo posible cuantitativa que deberá quedar documentada para poder ser comparada con la que surja en inspecciones futuras.

7.5.2. Frecuencia de monitoreo

En general es en los dos primeros años que las estructuras presentan problemas. Esto se debe a que tanto el asentamiento del suelo de fundación, como el acomodamiento de las unidades de la coraza y los principales cambios en la batimetría ocurren en los primeros momentos de la vida útil de la estructura. Esto motiva que la toma de medidas sea anual al principio para ir disminuyendo al constatarse que no se producen cambios en el medio ni fallas o desplazamientos en el espigón. El tiempo máximo entre toma de medidas no deberá exceder nunca los 5 años. Sin perjuicio de esto, ante un evento extremo es recomendable que se hagan inspecciones para cerciorarse que el mismo no ha producido cambios en la estructura.

7.5.3. Monitoreo de funcionamiento

El objetivo de este monitoreo es recabar los datos necesarios para evaluar si la estructura está funcionando como está previsto en el proyecto. En caso de no ser así el monitoreo debe otorgar información de base que permita establecer los motivos del apartamiento del funcionamiento predicho.

La función del espigón es la retención de arena por lo que los factores a monitorear serán el incremento del ancho de playa de La Aguada y la disminución en el ingreso de sedimentos al puerto.

Se propone llevar a cabo:

a) Relevamiento batimétrico del puerto

Serán tomados anualmente en los primeros 5 años. De no constatarse variaciones significativas se pasará a una frecuencia bianual. Luego de efectuarse dragados de mantenimiento del puerto se volverá a la toma de mediciones anuales. El relevamiento deberá incluir también el canal de acceso.

b) Relevamiento batimétrico de la playa y medición del perfil de playa seca

Se tomarán medidas cada 100 metros en los primeros 600 metros medidos desde el espigón hacia el norte hasta una profundidad de -3 Wh. En cuanto a la frecuencia de medidas se utilizará el mismo criterio que en el relevamiento del puerto. Es aconsejable también que las medidas sean tomadas en el mismo

mes del año para evitar posibles variaciones estacionales. Estos datos, además de utilizarse para evaluar el funcionamiento del espigón servirán a su vez para definir el momento de dragado[6].

c) Obtención de fotos aéreas y satelitales del arco de playa La Paloma-La Pedrera

Tanto las fotos aéreas como las satelitales contribuirán a comprender los cambios en el arco de playa, además de ser complementarias de las mediciones batimétricas. La escala de las mismas deberá como mínimo 1:10.000.

7.5.4. Datos complementarios

Para estimar las causas de un mal funcionamiento debe tenerse una buena fuente de datos del clima de oleaje, del clima de marea y de la granulometría de la arena de la playa.

En cuanto al clima de marea, en el puerto se encuentra en funcionamiento un medidor de nivel del mar, por lo que ya se cuenta con una buena fuente de información.

Sería deseable contar con mediciones continuas de altura y dirección de olas en la zona. De esta forma se tendría una buena base de información para comprender si un mal funcionamiento es debido a una mala estimación de este parámetro o a otras causas.

Los costos de contar con una boya a estos fines hace que sea difícil esta opción, sin embargo una campaña de medida de altura de ola tomada visualmente desde el puerto puede ser un objetivo bastante menos ambicioso. Existe un antecedente a este respecto en “Conservación y mejora de playas”, MTOP PNUD-UNESCO, 1979. La información de base que podría surgir de una campaña de este tipo podría ser útil para otros muchos emprendimientos a desarrollarse en la zona.

La granulometría de la arena de la playa puede servir de base no solo para recalcular el transporte de sedimentos en un futuro, sino también para saber en dónde depositar la arena dragada en el vaciamiento del espigón.

[6] Ver sección 7.3

7.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se han establecido los criterios generales para la reparación y mantenimiento funcional del espigón, así como la información básica requerida para poder hacerlo de forma aceptable.

Vale la pena recalcar la necesidad de realizar los controles descriptos en las secciones anteriores, así como de efectuar las reparaciones en la primera etapa de deterioro de la estructura, ya que si bien la reparación en esta primera fase podría llegar a parecer un gasto innecesario permitirá ahorros importantes al evitar reparaciones más costosas.

Por otro lado recabar y sistematizar datos (en particular complementarios) permitirá con un mínimo de inversión tomar mejores y más baratas decisiones, tanto en cuánto a la reparación del espigón como para futuros proyectos que puedan realizarse en la zona.

Capítulo 8 – Consideraciones Ambientales

8.1. Introducción

En la siguiente sección se hace un análisis ambiental del emprendimiento, describiendo las actividades de cada fase y haciendo hincapié en las más importares desde el punto de vista ambiental, incluyendo además una descripción del medio ambiente existente en la zona de implementación. Las afectaciones que el emprendimiento pueda tener sobre el entorno se presentan en la sección 3, haciéndose las recomendaciones del caso a fin de minimizar los aspectos negativos que aquel pudiera presentar.

En la sección 4 se presenta un plan de monitoreo y control para controlar el adecuado funcionamiento ambiental de la obra y detectar anticipadamente eventuales afectaciones no previstas.

8.2. Análisis ambiental del emprendimiento

El objetivo de este emprendimiento es la mejora en el funcionamiento del puerto de La Paloma. En la actualidad el puerto tiene serios problemas de aterramiento en buena parte de su rada; en particular, uno de los muelles de ribera se encuentra inutilizable. Para solucionar ese problema el presente informe recomienda la construcción de un espigón para retención de arena, que no solo mejorará la situación del puerto sino que además se espera que mejore las condiciones de la playa aledaña al mismo. Esta mejora se dará principalmente a través de la retención de arena que de otra manera ingresa al puerto y es extraída del sistema mediante dragados.

8.2.1. Fases del emprendimiento

Este emprendimiento consta de cuatro fases básicas, la fase de proyecto, de construcción, de operación y finalmente la fase de abandono. En este caso se analizan las fases de construcción, de operación y de un eventual abandono, no siendo tenida en cuenta la de proyecto pues a priori se juzga que no implica afectaciones ambientales significativas.

8.2.1.1. Fase de construcción

El elemento que se va a construir es, como se describe en el capítulo 4, un espigón de roca partida de 200 metros de longitud con dirección perpendicular a la costa, ubicado aproximadamente a 150 metros del muelle 3 (ver figura 8.1).

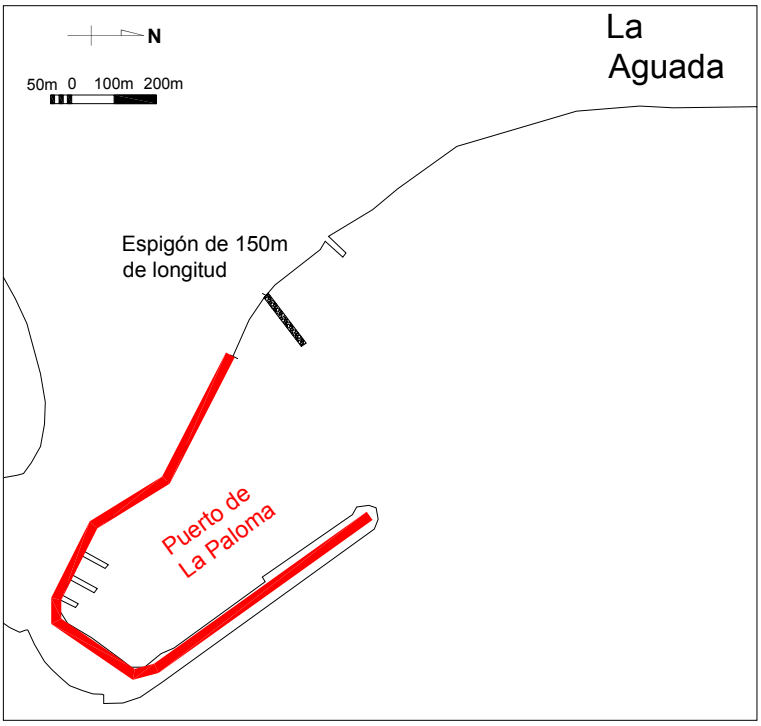


Figura 8.1 – Vista en planta del espigón.

La capa inferior (filtro) se compone de material fino de 6.6mm de diámetro medio. La protección del pie por rocas de entre 0.23 y 0.90 metros de lado dependiendo de la sección, la parte interior y exterior de la coraza por bloques de 0.15 a 0.66 y de 0.33 a 1.42 metros de lado respectivamente. Dentro de una misma capa los bloques de mayor tamaño corresponden a secciones más alejadas de la costa y por tanto más castigadas por el oleaje. A continuación se aprecia un corte de una sección tipo del espigón.

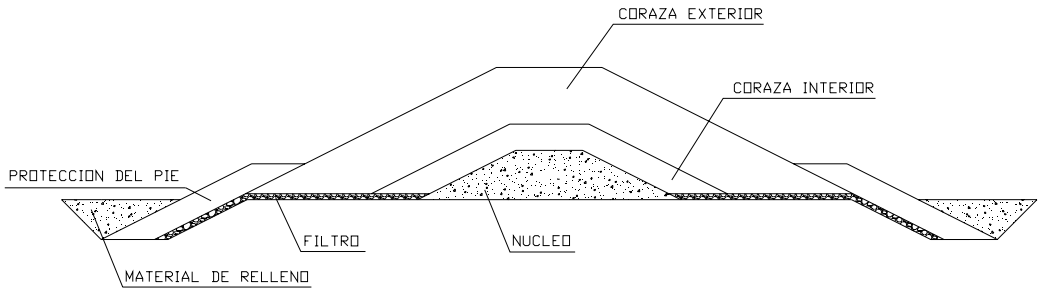


Figura 8.2 – Vista en corte del espigón.

Los volúmenes totales de rocas son los presentados en la tabla 8.1.

	Sobrepasado
Vol. de roca en bloques	7.650m3
Vol. de piedra para núcleo, relleno y filtro	2.800m3
Vol. Total	10.450m3

Tabla 8.1 – Volúmenes de roca a utilizar.

El material a utilizar será extraído de la cantera ubicada en el kilómetro 195 de la ruta 9 en el departamento de Rocha y será transportado en camiones hasta el obrador. Para esto se utilizarán seis camiones, una grúa y una pala cargadora en el predio de la cantera.

Una vez en el obrador las mismas serán movilizadas desde el mismo hasta su disposición final. Para esto se utilizará otra grúa, otra pala cargadora y otros dos camiones que estarán disponibles en el obrador. Para colocar los elementos de la coraza se utilizará una grúa que estará disponible sobre el espigón. [7]

El mantenimiento de todos los equipos será realizado en el predio del puerto.

A su vez se construirá una calle de tosca para comunicar el obrador con el lugar de emplazamiento el espigón. La misma tendrá una longitud aproximada de 200 metros.

El tiempo total de la obra será de 4 meses trabajando de lunes a viernes. Se recomienda que el inicio de la obra sea entre mayo y julio.

En la fase de construcción se procederá a dragar el excedente de arena que presenta el puerto y que impide su óptima utilización. Para tal fin se deberán realizar cartas batimétricas para estimar el volumen total a ser dragado. Sin desmedro de esto, a partir de dragados efectuados previamente puede preverse que el mismo será del orden de los 250.000m^3. [8] La disposición final de la arena dragada se elegirá dependiendo de su calidad. Esto último es discutido en la sección “Afectaciones sobre el medio ambiente” presentado en este capítulo, sección 3.2.5.

Luego de terminada la construcción del espigón se procederá al retiro de la maquinaria y al reacondicionamiento del predio utilizado como obrador, quitando los excedentes de piedra que puedan quedar y retirando baños, comedores y oficinas.

[7] Ver sección 6.5
[8] Volúmenes dragados anteriormente son presentados en la sección 3.5

8.2.1.2. Fase de operación

En la fase de operación, el espigón retendrá la arena transportada mediante corrientes litorales en dirección SE, cambiando así tanto la morfología de la playa en la zona cercana al espigón como la operativa y mantenimiento del puerto.

Si bien el avance del perfil de playa se dará gradualmente, su evolución estará guiada por una serie de oscilaciones condicionadas por las olas incidentes, percibiéndose en ocasiones un avance importante y en otras un retroceso relativo, pero manteniendo siempre una tendencia en el mediano plazo de acreción del perfil de playa. Este avance será del orden de 50 metros al cabo de 10 años. La orientación de la playa también presentará cambios a corto plazo, pero manteniendo una tendencia a mantenerse paralela a la posición actual.[9]

En la medida en que el espigón se llene, la arena retenida por el mismo debe ser retirada por medio de dragados. El volumen estimado a ser dragado cada 10 años es 130.000m^3.[10]

A su vez el canal de acceso del puerto debe ser mantenido con una cota superior a los 5 metros por lo que también son necesarias actividades de dragado esporádicas. Para la disposición final de las arenas del canal de acceso se seguirá un procedimiento similar al efectuado para las arenas de dragado del puerto, descrito también en este capítulo, sección 3.2.5.

Otra actividad propia de la fase de operación es el mantenimiento estructural del espigón. Según se describe en 7.4, el diseño del espigón presupone que en algún momento de la vida útil la ola de diseño puede ser superada, por lo que es posible que los elementos de la coraza sean exigidos por encima de su capacidad resistiva y por tanto sean movidos de su lugar original. Según la probabilidad de ocurrencia de la superación de la ola de diseño utilizada para el diseño del espigón, hay un 0.957 de probabilidad de que las reparaciones se tengan que efectuar cada 5 años o más.[11] Este desacomodamiento puede llegar a exponer al núcleo compuesto por materiales más livianos comprometiendo la estabilidad estructural del espigón.

Dependiendo de la magnitud del daño ocurrido se elegirá el momento para la reparación. Para daños menores se recomienda reparar en temporada baja mientras que para daños mayores se recomienda reparar con la mayor celeridad posible para evitar mayores daños en la estructura.

Si bien la probabilidad de ocurrencia de un colapso total de estructura es baja, en caso de suceder (por subestimación de la ola de diseño, por deficiencia en la construcción, por colisiones de embarcaciones, etc.) el espigón deberá ser

[9] Los cálculos se presentan en sección 4.8.3
[10] Ver sección 4.9
[11] Ver tabla 7.1

reparado inmediatamente tanto para restablecer la funcionalidad del mismo como para evitar daños mayores.[12]

8.2.1.3. Fase de abandono

El abandono puede darse de dos formas: tanto por el cese de las operaciones de mantenimiento del espigón (tanto de dragados como de reparaciones) como por el desmantelamiento de éste. En el primer caso el espigón se verá sobrepasado eventualmente y dejará de cumplir con su función de retención, por lo que en los dos casos ingresaría nuevamente arena al puerto.

En caso de requerirse el desmantelamiento, el procedimiento a ejecutar y las medidas de mitigación a implementar dependerán del motivo del mismo, por lo que carece de sentido efectuar el análisis en este informe. A modo de ejemplo, si la motivación de este hecho es una ampliación del puerto deberá estudiarse tanto la posibilidad de integración del espigón a la nueva configuración como un posible aprovechamiento de los bloques del mismo para la construcción de escolleras o espigones nuevos. De cualquier forma, sea cual sea el motivo de desmantelamiento, para el mismo deben tenerse en cuenta las implicancias ambientales del desmantelamiento en el marco de las afectaciones ambientales que el nuevo emprendimiento pueda causar.

[12] Ver capítulo 7 sección 4

8.2.2. Caracterización del medio

Para poder caracterizar el medio debe primero delimitarse el área de influencia del emprendimiento. Por encontrarse en la faja costera, el mismo tiene una estrecha vinculación con el mar, con el continente y con las actividades que en ellos se desarrollan. Además la costa tiene características propias que la hacen compleja y diversa, teniendo una gran importancia tanto del punto de vista estrictamente ambiental como del punto de vista social y cultural.

En la siguiente figura puede verse un esquema con la zona de influencia del emprendimiento.

Figura 8.3 – Zona de influencia del emprendimiento, se marca

Si bien para comprender la interacción con el medio se considera una zona muy amplia, se verá luego que las afectaciones más importantes están aproximadamente restringidas a las indicadas en la imagen.

Los cambios en la línea de costa serán más intensos en las cercanías del espigón, disminuyendo a medida que uno se aleja de éste. Para el estudio de la línea de costa se tomó como área de afectación los primeros 1000 metros

desde el puerto hacia La Pedrera. Para la cuantificación del transporte litoral se estudió todo el arco de playa.

Si bien la afectación sobre el mar será básicamente local, para comprender los fenómenos ambientales expuestos en este informe debe estudiarse su comportamiento a varios kilómetros de la costa.

En cuanto a lo económico y a lo social este emprendimiento afectará en particular a quienes tienen sus casas sobre la costa y en general a todos los residentes de la zona por apoyar el desarrollo local al mejorar las condiciones del puerto. Además de los residentes podría afectarse también a los turistas, que en verano acuden en miles a disfrutar estas playas, por lo que también deben tenerse en cuenta como parte de la población afectada.

En resumen, la zona afectada es tomada de la forma más amplia posible, viendo al emprendimiento enmarcado en un sistema amplio, complejo y lleno de interacciones que lo definen y condicionan. Sin desmedro de esto, las afectaciones más importantes estarán acotadas en un rango más bien reducido a las cercanías del espigón.

8.2.2.1. Medio Físico

Los elementos físicos más importantes han sido comentados y descritos en capítulos anteriores de este informe. Los más importantes son:

- Energía y distribución de las olas
- Nivel medio y variabilidad de las mareas
- Circulación de las corrientes cercanas a la costa
- Transporte de sedimentos
- Morfología de la costa

El clima de oleaje se describe en la sección 3.3. Allí se estudia cómo la dirección y altura del oleaje al acercarse a la costa cambia por asomeramiento y refracción, alineándose en dirección perpendicular a la costa y aumentando en altura.

Todo lo referente al comportamiento del nivel de mareas se describe en la sección 2.3. Allí puede verse que en esta zona los niveles medio de mareas son de 0.9m, registrándose máximos y mínimos para un período de retorno de 10 años de 2.22m y -0.28m respectivamente (todos los valores son referidos al cero Wharton).

T ret. (años)	Altura máxima	Altura mínima
5	2,06	-0,12
10	2,22	-0,28
20	2,32	-0,43

Por otro lado en la sección 2.4.3 se hace referencia a estudios que describen las tendencias macro del comportamiento del nivel medio del mar en una escala temporal amplia. Estos estudios indican que el nivel medio para esta zona desciende con una tasa de aproximadamente un centímetro cada 10 años, no siendo significativa esta variación a los efectos del presente estudio.

La transición mar-continente hace que se generen patrones de circulación de agua particulares, adoptando la forma de corrientes estables o transitorias que dependen fuertemente de las olas incidentes así como de otros factores, como la forma de la playa y las construcciones que en ella se realizan. En particular en la sección 3.4 se estudian las corrientes litorales, que son las capaces de producir transporte de sedimentos paralelos a la playa.

Este clima de oleaje actuando continuamente sobre la costa determina ciertos parámetros característicos de la playa, como ser su forma, su granulometría y su pendiente. En particular, tanto la granulometría como la pendiente de la playa decrecen cuanto menor es la energía del oleaje incidente sobre ella. Esto se evidencia en las diferencias tanto de granulometría como de pendiente que se aprecian en las playas cercanas al puerto de La Paloma y en las playas cercanas a La Pedrera. Mientras que las primeras reciben una baja energía de oleaje (tanto por la presencia de la escollera como por la orientación de la costa) y tienen una granulometría y pendiente bajas, las segundas reciben una gran energía de oleaje (principalmente por la dirección de la costa) y tienen granulometría y pendiente mayores.[13]

Es así que la playa de La Aguada se presenta como una playa tendida, de arena húmeda en buena parte de su ancho, con una granulometría fina y homogénea. Esto puede hacer pensar en un perfil de tipo erosivo. Los vecinos dicen que efectivamente la playa ha retrocedido en los últimos años, pero la escasez de fotos aéreas no permite sacar conclusiones definitivas sobre este asunto.[14] Sin embargo, debe señalarse que tanto la forestación como la urbanización de la zona costera que antes era ocupada por médanos disminuye los aportes del continente y es concordante con la idea del retroceso de la playa. Por otro lado es un hecho que la arena dragada del puerto está siendo retirada del sistema, agravando el problema, o por lo menos no cooperando con la manutención de la línea de playa. Estos volúmenes son tan importantes que si no fuera por aportes de arenas del continente el retroceso de la playa tendría una tasa de unos 2 metros por año.[15]

8.2.2.2. Medio Biótico

En general la costa rochense se caracteriza por poseer una gran biodiversidad, contando por ejemplo con un promedio de entre 30 a 40 especies de invertebrados. La biodiversidad acuática en las costas uruguayas sigue ciertos patrones, aumentando hacia el noreste y por tanto teniendo su máximo en las playas de La barra del Chuy. Dentro de las especies que habitan permanentemente en la zona pueden distinguirse dos tipos: las que tienen por

[13] Ver sección 2.6.2
[14] Ver sección 3.6.6
[15] Ver sección 3.6.7

hábitat la arena y las que por el contrario lo tienen en substrato rocosos. Como las estrategias de supervivencia de unas y otras son completamente distintas, las especies han desarrollado características diferentes y en cierta medida antagónicas. Además de las especies que residen en la zona intermareal (zona comprendida entre la línea de marea alta y la de marea baja) hay otras especies que visitan esporádicamente esta zona para proveerse de comida o para utilizarla como zona de cría o "nursery". Estas especies pueden ser tanto peces (como la corvina, el lenguado o el pejerrey) o aves (gaviotas, gaviotines o chorlitos).

Si bien la costa rochense cuenta con una gran biodiversidad, el arco de playa La Paloma-La Pedrera (y por tanto el área de afectación del emprendimiento) no cuenta con especies endógenas, no resultando un subsistema de particular unicidad ya que existen otros similares en otros lugares de la costa.

8.2.2.3. Medio Antrópico

La ciudad de La Paloma cuenta con unos 5.000 habitantes permanentes, cantidad que aumenta a unos 30.000 habitantes durante la temporada turística.

La principal actividad de la zona son los servicios relacionados con la industria del turismo. Dentro de estos servicios se pueden encontrar numerosas ofertas gastronómicas, de hotelería, casas para alquiler, supermercados, almacenes, y hasta una escuela de surf.

Otra actividad que otrora tuvo un gran auge en la ciudad es la relacionada con la actividad pesquera. Esta actividad tuvo su máxima expresión en la década de 1980, cayendo luego en una recesión de la que todavía no ha podido salir completamente. En la actualidad existe una fábrica de procesamiento de pescado que opera en el mismo puerto de La Paloma.

La playa de La Aguada, la más contigua al emprendimiento, cuenta con aproximadamente 35.000 m^2 que son aprovechados en el verano para esparcimiento. Si bien entre el puerto y la zona en que se emplazará el espigón hay otros 3.500 m^2 de playa éstos casi no son aprovechados dada la cercanía al puerto y la fábrica que allí se encuentra.

En esta misma zona pero en el continente puede apreciarse que el grado de urbanización es nulo en los primeros kilómetros ya que en ellos se encuentra el Parque Municipal Andresito. Luego del mismo, hay un cierto grado de urbanización que se concentra entre la Ruta 15 y la playa inclusive (ver figura 8.3).

Tanto el predio del parque como varias hectáreas de particulares se encuentran forestadas, lo que ha producido la fijación del suelo arenoso, reduciendo así los aportes de arena desde el continente hacia la playa.

La infraestructura vial consta de la Ruta 15 que conecta La Paloma con la ciudad de Rocha, la Avda. Costanera que sigue la línea de costa y comunica los balnearios secundarios que se encuentran entre La Paloma y Arachania y

calles secundarias de menor porte. Todos los balnearios de la zona cuentan con la mayoría de sus calles de tosca y una minoría de asfalto. El estado general de las calles, tanto de tosca como de asfalto, es relativamente malo.

8.2.2.4. Medio Simbólico

Más allá de la importancia que las playas tienen como un recurso económico, también tienen una gran importancia desde el punto de vista simbólico. En efecto, tanto la población local como los turistas identifican la zona con sus playas y tienen en alta estima el paisaje natural que presentan. La preservación del mismo es de gran importancia tanto para los vecinos como para los turistas.

Figura 8.4– Foto aérea de la playa de La Aguada.

8.3. Afectaciones sobre el medio ambiente

En las secciones anteriores se caracterizó el medio ambiente y se enumeraron las actividades que componen el emprendimiento. En esta sección se analiza la interacción entre el emprendimiento y el medio. Estas interacciones son resumidas en la matriz de interacción presentada en tabla 8.2.

		Medio físico					Medio biótico			Medio antrópico						Medio Simbólico
	Actividad	Energía y distribución de las olas	Nivel de marea	Circulación de corrientes cercanas a la costa	Transporte de sedimentos	Forma de la costa	Fauna piscícola	Organismos de sustrato rocoso	Organismos de sustrato arenoso	Turismo	Actividad portuaria	Pesca	Industria pesquera	Circulación vehicular	Recreación	Paisaje
Fase construcción	Imposición del obrador									X						
	Acarreo de material									X						
	Transporte de material									X				X		
	Construcción de filtro									X						
	Construcción del núcleo									X					X	
	Construcción de la coraza									X					X	
	Mantenimiento de maquinaria									X					X	
	Dragado y disposición de arenas del puerto							X		X						
Fase operación	Presencia de espigón			X	X	X	X		X	X					X	X
	Mejora operativa del muelle										X	X	X			
	Mantenimiento del espigón									X					X	
	Dragado mantenimiento del puerto								X		X					
	Dragado de mantenimiento del espigón														X	
Fase Abandono	Desmantelamiento de espigón			X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
	Adecuación de playa					X										X

Tabla 8.2– Matriz de interacción.

8.3.1. Afectaciones en la fase de construcción

En líneas generales la construcción del espigón traerá aparejada una serie de movimientos y actividades que son incompatibles con el uso recreacional de ese sector de la playa, por lo que se recomienda que la construcción del mismo no se realice durante la temporada turística. Esto implica que el mismo debe ser construido entre los meses de mayo a noviembre.

A continuación se describen los aspectos ambientales de la fase de construcción y sus afectaciones sobre el medio ambiente.

8.3.1.1. Afectación sobre el transporte e infraestructura vial

Los bloques y las rocas del núcleo serán transportados desde la cantera, por Ruta 9 hasta la Ruta 15 para tomar luego Avda. de los Argentinos hasta Avda. Costanera y por último el acceso al puerto (ver figuras 8.5 y 8.6) . Para hacerlo serán necesarios aproximadamente 1500 viajes (19 viajes por día durante los cuatro meses de construcción) con una carga de 10m^3 de material cada uno. [16]

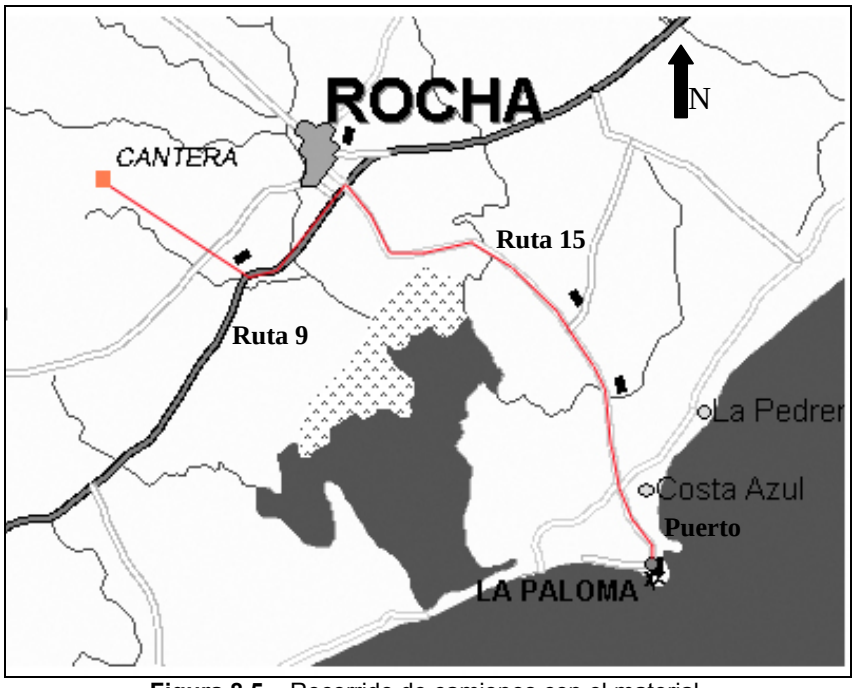


Figura 8.5 – Recorrido de camiones con el material.

[16] Ver sección 6.5

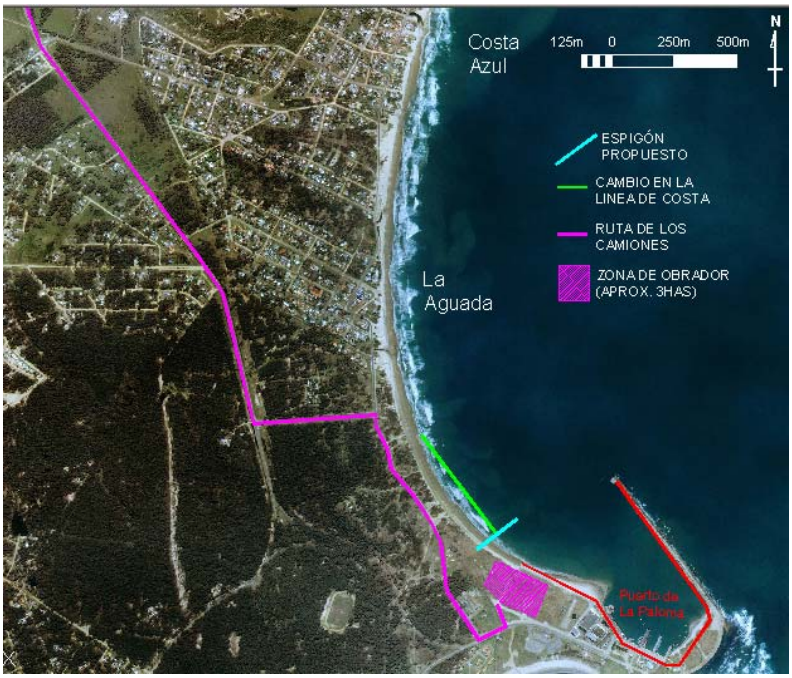


Figura 8.6 – Foto aérea de la zona del emprendimiento.

Transportar un volumen de estas características afectará el tránsito normal de las calles interiores, pudiendo producir molestias para quienes circulan por estas calles y para quienes tengan casas sobre las mismas. Esto se ve atenuado por la escasa cantidad de viviendas en buena parte del recorrido seguido. En cuanto al tránsito, las calles que van a ser utilizadas no tienen un tránsito intenso fuera de temporada, por lo que las posibles molestias que puedan producirse tendrán un alcance muy limitado. Así y todo, se recomienda no hacer acopio de material durante los fines de semana.

El tránsito de camiones con carga pesada tanto por las calles interiores, por rutas nacionales y por puentes podría llevar a acelerar el deterioro de los mismos. En particular existen cuatro puentes en el recorrido, estos están capacitados para soportar la carga de los camiones y el material, pero la alta frecuencia de los viajes puede significar un gran deterioro para estos.

8.3.1.2. Imposición del obrador y acopio del material

Tanto los bloques de granito como las rocas del núcleo y del filtro serán depositados transitoriamente en el obrador. El mismo tendrá un área aproximada de 1.000m^2. En la figura 8.6 se indica una zona disponible para el mismo con un área total de cerca de 3 hectáreas. Dentro de esta zona, mucho más amplia que la requerida, podrá disponerse el obrador.

El predio es elegido teniendo en cuenta la cercanía al lugar de emplazamiento de la obra, la escasa presencia de urbanización en las inmediaciones y que por estar dentro del predio portuario el uso que se le dará no contraviene otras actividades que se realizan en el lugar. Cabe recalcar que la presencia del obrador no afectará los aportes de arena que se puedan dar desde el continente hacia la playa ya que este estará dispuesto en una zona

actualmente cubierta de vegetación y no significará una barrera física que impida el transporte de arena.

8.3.1.3. Vertimiento de aceites

Se recomienda que el mantenimiento de las máquinas se haga en el predio del puerto. De esta forma las implicaciones ambientales serán las mismas que las del mantenimiento de las máquinas del puerto mismo. Al efectuar cambios de aceite y cargas de combustible se recomienda colocar una bandeja metálica debajo del vehículo para colectar posibles derrames, evitando así que estos lleguen al suelo.

8.3.1.4. Ruidos y polvo

Tanto el movimiento del material para la obra como el movimiento de la maquinaria necesaria para la misma producirán ruidos y polvo. Estas afectaciones están restringidas a las cercanías de las fuentes que las generan. Tanto la ruta seguida por los camiones como la localización del obrador fueron seleccionados teniendo en cuenta la escasa cantidad de construcciones cercanas a los mismos por lo que no es esperable que estas molestias sean de significancia.

En cuanto al ruido que pueda producirse en la playa, como la obra es realizada fuera de la temporada veraniega no es esperable que estos impliquen molestias para los usuarios de la misma.

También se recomienda evitar el trabajo durante los fines de semana.

8.3.1.5. Dragado inicial del puerto

Como fue mencionado anteriormente, durante la construcción del espigón se procederá a dragar el exceso de arena que presenta el puerto de manera de que quede en óptimas condiciones de operación en lo que a esto respecta.

Para ello se deberá realizar un estudio estimativo del volumen de sedimentos a dragar, no solo para efectuar el estudio de costos y elegir la maquinaria adecuada para tal fin, sino también para poder elegir convenientemente el lugar donde realizar la disposición final. A pesar de que la estimación se debe realizar a partir la creación de una carta batimétrica para luego compararla con el nivel de puerto deseado, se estima (a partir de datos de volumen de sedimentos dragados en el puerto en años pasados) que el volumen de sedimentos a dragar rondará los 250.000 m^3.

A su vez, se deberá tomar una muestra de los sedimentos a dragar con el fin de estimar el grado de contaminación y ciertos parámetros como los límites de Attenberg, la gravedad específica y la relación de vacíos (suponiendo a priori a partir de muestras tomadas que se trata de un material fino). Estos parámetros sirven para tener una idea del tipo de sedimento que se dragará y el peso que tendrá una vez dragado el volumen dispuesto.

A partir de los estos datos se podrá elegir el lugar a utilizar para la disposición final, teniendo en cuenta primero consideraciones ambientales y luego las económicas de operación. Entre las consideraciones ambientales hay que tener en cuenta tanto las físicas y las químicas como las biológicas.

En cuanto al tipo de sedimento a dragar, es esperable que tenga un gran contenido de arena y un bajo contenido de materia orgánica y de arcilla. Estas suposiciones se hacen a partir de ciertas muestras tomadas y recordando que los sedimentos que se encuentran en el puerto fueron transportados en gran medida por las corrientes litorales desde las playas aledañas. De todas maneras, esta información quedará en evidencia a partir de los ensayos realizados, suponiendo a partir de aquí en lo que al análisis ambiental respecta que los sedimentos a dragar tienen características similares a las muestras previamente tomadas por el grupo de proyecto y a muestras tomadas por el MTOP (principalmente arena de granulometría muy fina con bajos contenidos de arcilla y materia orgánica).

Al tener un bajo contenido de arcilla y de materia orgánica, la capacidad de retención de contaminantes de los sedimentos también es baja. A pesar de esto, el hecho de que las fuentes de contaminación estén tan cerca (tanto el propio puerto como los vertimientos de las industrias actuales y pasadas) hace que sea esperable que los sedimentos tengan una contaminación digna de ser atendida con especial cuidado.

A su vez, esta dificultad para retener contaminantes que tienen los sedimentos ricos en arena hace que una vez dispuestos en aguas no contaminadas tiendan a liberar los mismos rápidamente.

En lo que a la turbiedad generada en la disposición final respecta, es esperable que las concentraciones sean grandes cerca del punto de descarga, bajando rápidamente al alejarse aguas abajo de la fuente y lateralmente de la línea central de la pluma. Esta pluma estará sujeta a las condiciones hidrodinámicas presentes en el lugar en el momento de la disposición, y se disipará de manera relativamente rápida una vez terminada la operación.

Un pequeño porcentaje de los sedimentos más finos son dispersados en el agua como una pluma de turbiedad; sin embargo, la gran mayoría rápidamente desciende hacia el fondo en el lugar de disposición donde se acumula bajo el punto de descarga. A su vez, en aguas calmas es esperable que hasta el 98% de los sedimentos quede como una capa semi-fluída, mientras que el restante 2% puede ser resuspendido por mezclarse con la capa de agua inmediatamente adyacente. Este 2% inclusive puede fluir si las pendientes son mayores al 1%.

Otro posible impacto a atender es la disminución del nivel de oxígeno disuelto, tanto en la columna de agua encima del lugar de disposición como en el agua atrapada en los poros de los sedimentos. En lo que a la columna de agua respecta no se aprecia una disminución significativa del oxígeno disuelto, inclusive en las tareas de disposición. Por otra parte, en el oxígeno presente el agua atrapada en los poros se puede constatar una cierta disminución a

mediano plazo en los niveles de éste, sobre todo en suelos de granulometría fina. Esta disminución será significativa o no dependiendo de la demanda bental de oxígeno.

En cuanto a los impactos biológicos, la dispersión del material dispuesto puede tener una relativa significancia en el impacto a corto plazo a los organismos bénticos. La disposición de suelos finos puede resultar en una reducción sustancial de la cantidad de organismos en la zona de disposición. De todas maneras, a pesar de esto, la recuperación de la comunidad comienza poco tiempo después que termina la tarea de disposición.

La recolonización de animales en el nuevo sustrato y la emigración vertical de los organismos bénticos en el nuevo suelo dispuesto son los principales mecanismos de recuperación. Los primero organismos en recolonizar el material dispuesto usualmente no son los mismos que originalmente ocuparon el sitio; estos consisten en especies oportunistas con requerimientos ambientales suficientemente flexibles para adaptarse en estas áreas perturbadas. El restablecimiento de las especies originales puede durar algunos meses, y la recuperación completa puede llevar 1 o 2 años.

En este caso en particular los impactos se verán minimizados, ya que se dispone arena en una zona donde el suelo es arenoso. Cuando los sedimentos son disímiles la recolonización es más lenta y puede ser que la nueva comunidad no tenga relación alguna con la precedente, pero este no será el caso.

En lo que a la metodología de disposición respecta, cuanto más fina es la capa de material dispuesto más fácil es para los organismos efectuar la migración vertical a través del material. El deseo de minimizar los impactos físicos mediante dispersión puede llegar a ser contraproducente ya que, dado que estos suelos son potencialmente contaminantes, conviene disponerlos en zonas de retención en vez de dispersión. Esto maximiza el impacto en el hábitat de la zona de disposición, pero confina los potenciales peligros químicos a la misma área.

Debido a que estos sedimentos a dragar pertenecen a un puerto comercial, es esperable que contengan una cierta cantidad de derivados de hidrocarburos. Cuando un sedimento entra en contacto con un residuo grasoso puede retener ciertas propiedades tóxicas por años. Los derramamientos de aceites son conocidos por ser absorbidos rápidamente por partículas suspendidas. Estas partículas luego pueden sedimentar para posteriormente suspenderse nuevamente en la etapa de disposición. Así y todo, la cantidad de aceite liberado en el proceso de resuspensión es muy baja.

Según el fascículo “Dredged and Dredging Desposal” del U.S. Army Corps of Engineers, experiencias de laboratorio con organismos expuestos a material dragado con miles de partes por millón de aceites y grasas mostraron una mortalidad muy baja. Esto se debería a que de los miles de químicos que constituyen la fracción de aceites y grasas, solamente unos pocos podrían ser

considerados de peligro significante para la vida acuática cuando son asociados con material dragado.

Para cuantificar los impactos biológicos que trae aparejado la disposición final de material dragado, los trabajos de laboratorio describen las peores condiciones posibles, realizando relativamente cortas exposiciones con altas concentraciones de contaminantes. A pesar de tener un alcance limitado, los resultados muestran ausencia de efectos significativos bajo estas peores condiciones, apoyando las conclusiones a largo plazo que dicen que los efectos de dragado y disposición serán mínimos.

De todas maneras, test químicos apropiados y evaluaciones biológicas del material dragado pueden ser usados para resolver muchos de los problemas que se puedan suscitar. Los parámetros a los cuales ajustarse son tomados por recomendaciones SQuiRT (Screening Quick Referente Tables) de la NOAA (Nacional Oceanic and Atmospheric Administration). Estos parámetros son tan solo los más relevantes, pero de igual manera a la hora de ser dispuestos en playas para recreación se sugiere considerar las recomendaciones de dicha administración.

Metal	Valor límite (ppb)
Cromo (Cr)	52.300
Niquel (Ni)	15.900
Cobre (Cu)	18.700
Zinc (Zn)	124.000
Cadmio (Cd)	676
Mercurio (Hg)	130
Arsénico (As)	7.240
Plomo (Pb)	30.240

Tabla 8.3– Valores límite de metales ciertos metales pesados para la disposición en playas recreativas. Recomendadas por SQuiRT de la NOAA.

En resumen, dado que el suelo a dragar es una arena de granulometría muy fina con bajo contenido de arcilla y materia orgánica ubicada muy cerca de las fuentes de contaminación, es esperable que tenga un nivel de contaminación relativamente importante, y que a su vez este sea liberado rápidamente luego de su disposición. Es por esto que a priori no se recomienda utilizar estos sedimentos dragados como relleno de una playa con fines recreativos, a no ser que los valores que arrojen los análisis de calidad de sedimentos realizados indiquen lo contrario. Estos sedimentos se recomiendan disponer en un lugar con aguas profundas de manera de sacarlos del sistema de costa La Paloma-La Pedrera y de los sistemas de costa aledaños.

A su vez, se recomienda que los sedimentos sean dispuestos de manera que retenga los contaminantes en vez de dispersarlos, haciendo efectiva esta recomendación al disponerlos formando una capa de espesor considerable y tratando de reducir el área afectada.

Mediante estas medidas, los impactos que puedan ocurrir se minimizan en gran forma, no teniendo mayor influencia en la biota ya que esta recolonizará la zona en un lapso no mayor a 2 años.

8.3.2. Afectaciones en la fase de Operación

8.3.2.1. Cambio en la línea de costa

Luego de construido el espigón producirá una serie de cambios en el medio físico que afectará los usos que hasta el momento se le daban a la zona. Se espera que el espigón funcione como una barrera que intercepta la corriente litoral, evitando la entrada de arena al puerto y reteniendo los sedimentos en su lado norte. De esta forma el espigón modifica el patrón de circulación, modificando así la morfología de la costa.

Como se ha señalado en la caracterización del medio físico, hay dos efectos que hoy en día están afectando el perfil de la playa. Por un lado las construcciones, rutas y otros emprendimientos están reduciendo los aportes de arena desde el continente. Por otro, los volúmenes de arena que entran al puerto anualmente son retenidos en él para finalmente ser dragados y arrojados fuera del arco de playa. El espigón, al retener estas arenas, hará que estos volúmenes de arena dejen de ser perdidos por el sistema, propiciando un avance (o por lo menos atenuando la tasa de retroceso) de la línea de playa.

Estas mejoras en las condiciones de la playa, además de ser positivas en sí mismas por preservar al medio ambiente, serán un beneficio para quienes usan la playa con fines recreativos, ya sean turistas o residentes. Al ser la playa el principal atractivo turístico de la zona también el turismo se verá beneficiado.

A pesar de todas estas mejoras en la calidad de la playa, es posible que en algunos momentos las mismas no sean apreciadas por la población en general. En efecto, como puede verse en 4.8.2 la tendencia general de la línea de costa será de crecimiento; no obstante, dependiendo de las olas incidentes, en ciertos momentos podría presentarse un retroceso relativo de la zona contigua al espigón del lado de la playa.

Esta situación podría dar a los residentes la falsa impresión de que el espigón no está funcionando como es debido, o peor aún, de que el mismo está afectando negativamente el avance de la línea de costa. Para evitar esta falsa impresión es importante mantener informados a los residentes y turistas sobre el fin y funcionamiento del espigón. Para esto se deberá disponer cartelería en la bajada a la playa más cercana.

En cuanto al lado sur del espigón entre el mismo y el muelle Nº3 se encuentra un tramo de playa de 150 metros de longitud (ver imagen 8.6). A partir de los estudios realizados no se espera que ésta se erosione significativamente, pero esto no puede ser asegurado sin realizarse estudios más profundos sobre cómo reaccionará la misma frente a la presencia del espigón. De cualquier forma una posible erosión no tendrá repercusiones en el uso actual de la playa, ya que esta zona por encontrarse a escasos metros del puerto prácticamente no es utilizada.

Figura 8.6 – Vista desde el lugar de emplazamiento del espigón hacia el puerto.

8.3.2.2. Modificación del patrón de circulación de corrientes

La presencia del espigón como se señaló anteriormente producirá cambios en los patrones de circulación de las corrientes en las cercanías al mismo. Al acercarse las corrientes litorales al espigón y encontrarse con esta barrera, las mismas virarán en dirección perpendicular a la playa, produciendo una corriente en dirección saliente a la misma.

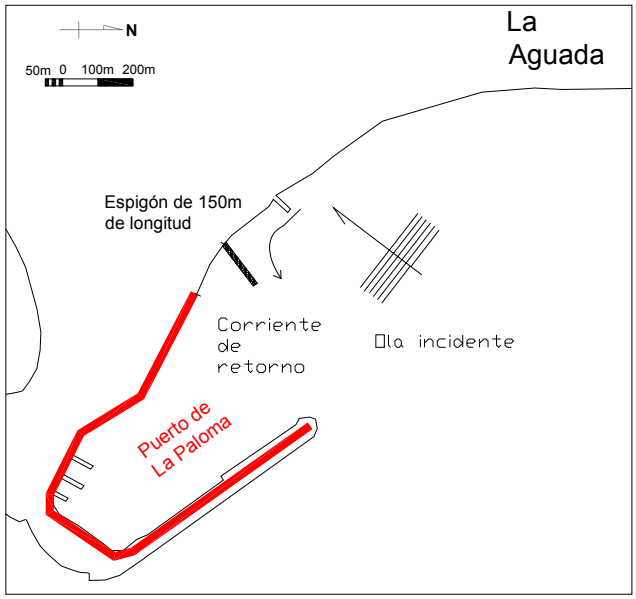


Figura 8.7 – Corriente de retorno producida por la presencia del espigón.

La intensidad de esta corriente depende de la intensidad y dirección del oleaje, así como de las características del espigón. El ser este construido con roca partida en vez de ser un muro vertical de hormigón, así como la escasa longitud del mismo, hacen que las corrientes generadas sean poco significativas.

Si bien es poco probable que estas corrientes originen erosión en la zona cercana al mismo, sí podrían producir una cierta acumulación de arena en las

cercanías al canal de acceso al puerto, por lo que la necesidad de dragado podría verse levemente incrementada por este hecho. A pesar de esto el volumen a dragar se estima sería muy inferior al actualmente dragado para el mantenimiento de la zona de atraque.

Cabe aclarar que las corrientes de retorno generadas difícilmente implican dificultades de maniobra para los barcos, ya que el canal de acceso al puerto se encuentra a más de 250 metros del espigón.

No obstante, la conjunción de estas corrientes con la presencia del espigón hace que la zona aledaña al mismo sea muy peligrosa para los bañistas. En la fase de operación del espigón deberá estar prohibido el baño en la zona cercana al mismo. Para esto deberá coordinarse con la Intendencia Municipal de Rocha la puesta de la señalización pertinente, así como la presencia de salvavidas en esta zona en los meses de temporada alta. La zona en que estará limitado el uso será de 100 metros, pero dependiendo del oleaje incidente (que determinará las corrientes generadas) los salvavidas podrán redefinir esta zona, ampliando la zona de restricción.

De cualquier manera, ésta reducción en la zona utilizada para baños (que puede resultar negativa para el uso recreacional) es ampliamente compensada con la preservación del ancho de playa.

8.3.2.3. Afectaciones sobre la biota

Las afectaciones sobre el medio biótico pueden verse desde dos puntos de vista. Por un lado la presencia del espigón disminuye el área hoy disponible para la vida de organismos que tienen por sustrato al medio arenoso. Esta disminución es mínima en comparación con el área total disponible para estas especies, que cuentan con varios kilómetros de arco de playa, por lo que la biota general de la zona no se verá afectada significativamente por esta causa. Por otro lado los elementos de la coraza pueden servir de sustrato a organismos que viven en medio rocoso. Además la zona cercana al espigón, al quedar al resguardo de las olas, puede servir como potencial lugar de desove y cría para peces, por lo que éstos también se verían beneficiados por la presencia del espigón.

8.3.2.4. Cambios en la operativa del puerto

Sin lugar a dudas lo que se verá más afectado será el funcionamiento del puerto. Por un lado las necesidades de dragado de mantenimiento se verán minimizadas. Esta disminución en la periodicidad del dragado no solo implica un importante ahorro económico, sino que además disminuye los tiempos muertos en los que la operativa del puerto se ve comprometida por esas tareas de mantenimiento. Por otro lado la barrera que conforma implica que disminuya sensiblemente la acumulación de arena en la zona del muelle tres.

Esto posibilitará el uso de este muelle de ribera que hasta el momento ha permanecido totalmente aterrado por la entrada de sedimentos.

Ambos factores disminuirán las necesidades de maniobra de los barcos, que hoy tienen que esquivar un importante banco de arena en la zona indicada. Adicionalmente, al ampliar la zona de muelle disponible se permitirá el atraque de más barcos y se evitará el actual uso de amadrinamientos.

Figura 8.8 – Vista desde el muelle Nº3 hacia la playa. En el fondo de la imagen puede apreciarse el banco de arena que impide la correcta utilización del muelle.

Estas mejoras operativas harán que el puerto pueda brindar más y mejor servicio, mejorando su uso como puerto de pesca y deportivo, estando en consonancia con el desarrollo industrial y turístico que la zona pretende tener. A pesar de esto, si bien es posible que se de un incremento del tráfico portuario esto estará condicionado por la demanda de uso que tenga el mismo, y que no depende solo de la capacidad del puerto sino también de factores económicos que lo trascienden (en particular la situación de la pesca y de la industria pesquera, así como de la fábrica que está ubicada dentro del predio mismo del puerto).

Así y todo, la presencia del espigón puede implicar cierto riesgo de accidentes para las embarcaciones, sobre todo en eventos de tormentas. Es por esto que se dispondrá de una baliza en la punta del espigón de manera distinguirlo con mayor facilidad y así prevenir estos accidentes.

8.3.2.5. Dragado de mantenimiento del canal de acceso al puerto

Durante la operación del espigón se deberán efectuar dragados de mantenimiento del puerto. Estos dragados serán de un volumen sustancialmente menor que los volúmenes extraídos en el primer dragado. A

pesar de esto para su disposición final se deberán tener los mismos recaudos que para las arenas del dragado de la fase de construcción[17].

8.3.2.6. Vaciamiento del espigón

El espigón fue diseñado para evitar el actual ingreso de sedimentos al puerto de La Paloma. Es factible que la acumulación de sedimentos en el espigón genere un avance en la línea de costa en sus inmediaciones produciendo una baja en la efectividad de retención de arena[18]. Esto se deberá solucionar dragando parte de los sedimentos retenidos en el espigón de manera de retirar la línea de costa y volver a los valores iniciales de efectividad, recomendándose efectuarlo cuando la línea de costa tenga un avance de 50 metros[19].

Como fue visto en "Dragado inicial del puerto"[20], el tipo de sedimento, el volumen a dragar y la calidad de los sedimentos son parámetros fundamentales para decidir el lugar final de disposición.

En lo que a los sedimentos que se acumularán en el espigón respecta, es esperable que estos tengan una calidad semejante a la que poseen las arenas de las playas aledañas (de no aparecer una fuente puntual de contaminación hoy en día inexistente). Esta similitud de calidad permite disponerlos en cualquiera de las playas aledañas sin mayores implicancias en lo que a impactos químicos respecta.

Por otra parte, para reducir los impactos físicos se recomienda (ya que no hay peligro de liberación de contaminantes) disponerlos en un área extensa de un espesor reducido, de manera que la biota bentónica pueda colonizar los sedimentos dispuestos más fácilmente.

En cuanto a la afectación al medio antrópico vale decir que el dragado de mantenimiento del espigón es incompatible con el uso recreacional de la playa. Al ser el avance de la línea de playa gradual y relativamente lento[21] pueden programarse los dragados para que los mismos no coincidan con la temporada veraniega. Cabe aclarar que estos dragados no afectarán el normal funcionamiento del puerto.

8.3.2.7. Mantenimiento del espigón

La eventual necesidad de reparación[22] del espigón supone una serie de movimientos muy similares a los de la fase de construcción, por lo que las consideraciones ambientales pertinentes serán las mismas que las tomadas en dicha fase. La duración y momento de la obra de reparación dependerá de la magnitud de la misma. En cualquier caso siempre se tendrá como criterio evitar

[17] Ver sección 8.3.1.5
[18] Ver sección 4.8
[19] Ver sección 7.3
[20] Sección 8.3.2.5
[21] Ver sección 4.8
[22] Ver sección 7.4

en la medida de lo posible los meses de temporada, así como también los fines de semana.

8.3.2.8. Afectaciones sobre el paisaje

El espigón tendrá una altura en la orilla de la playa de 2 metros. Esto quiere decir que en un día con un nivel medio del nivel del mar una persona que camine por la orilla al llegar hasta el espigón quedará apenas por debajo del nivel de éste. En un día con nivel del mar bajo, en donde la orilla se encuentra más retirada, el espigón sobresalirá aproximadamente tres metros y medio por encima del nivel del suelo, por lo que quedaría muy por encima de la visión de una persona parada a su lado. Como se comprenderá esto implica que el mismo será visto desde una cierta distancia y que obstaculizará la vista hacia el otro lado. Estos dos efectos son los que se analizan someramente en esta sección.

En cuanto al primer aspecto en la figura 8.9 se presenta un fotomontaje que ilustra cómo se vería desde la playa La Aguada. Allí puede apreciarse que si bien el espigón es visible no resulta discordante con el resto del paisaje ya que el mismo se encuentra dominado por la presencia del puerto, de sus muelles y de su escollera de cierre. Esta es una ventaja de ser un espigón de roca partida y no un muro vertical de hormigón, ya que un espigón de ese tipo hubiera presentado una disrupción más importante.

Figura 8.9 – Fotomontaje ilustrativo de la vista del espigón desde la zona sur de la playa La Aguada.

En lo que respecta a la obstaculización de la vista puede decirse que si bien la obstrucción que presentará desde la playa hacia el puerto será relativamente importante en los primeros metros, esta interferencia disminuye paulatinamente hasta que deja de producirse. Como atenuante de este hecho la vista que es interceptada no es de una gran calidad estética. Básicamente se trata del muelle Nº3 y de la zona industrial del puerto. Incluso hasta podría pensarse que la obstrucción de esta vista, si bien restringe la cuenca visual en las cercanías del espigón, es una ventaja (ver imagen 8.6).

En cuanto a la vista desde el lado del puerto hacia la playa, si bien el paisaje afectado será de una calidad mayor, el uso que tendrán estos pocos metros de playa seguirá siendo casi nulo dada la cercanía del puerto.

8.4. Plan de monitoreo y control ambiental

El plan de monitoreo y control ambiental es desarrollado para prevenir posibles impactos no previstos y para controlar el adecuado funcionamiento ambiental. En particular se hace especial énfasis en el avance en la línea de costa y en el ingreso de arena al puerto.

Las actividades de monitoreo aquí descritas están en consonancia y se complementan con las actividades de monitoreo del funcionamiento del espigón descritas en la sección 7.4.

El avance de la línea de costa en las cercanías del espigón se monitoreará visualmente, mediante mediciones del perfil de playa y mediante fotos aéreas, contrastando el avance real con el avance supuesto en este informe. En caso de que estos avances no coincidan en su orden de magnitud caben diversas posibilidades:

a) que los sedimentos de alguna manera sigan ingresando al puerto no siendo retenidos por el espigón

b) que la suposición de oleaje incidente en la zona del emprendimiento no sea la correcta, por lo que la arena retenida en el corto plazo en el espigón sea nuevamente transportada hacia el norte.

c) que las corrientes de retorno mencionadas en este capítulo tengan una intensidad mayor a la esperada transportando los sedimentos en dirección transversal a la costa.

En el punto a), la situación del retroceso de la línea de costa con respecto a la actual se vería incambiada. A pesar de esto no se darían los efectos positivos esperados y el espigón no estaría cumpliendo con su principal objetivo que es impedir el ingreso de arena al puerto. En este caso se deberá estudiar nuevamente el problema según se describe en 7.5.

En el punto b) la situación no traería aparejados mayores inconvenientes, ya que los volúmenes de arena que se supusieron iban a ser retenidos en las cercanías al espigón se mantendrán en el sistema costero engrosando o desacelerando la regresión del ancho de playa en otra zona.

En el punto c) la situación puede traer serios inconvenientes ambientales, ya que cabe la posibilidad de que la arena que es transportada en dirección transversal a la costa mediante corrientes de retorno salga del sistema, sobre todo en grandes tormentas. En este caso el ancho de playa podría verse seriamente afectado, no solo no deteniendo el retroceso sino que inclusive acelerándolo. En este caso se deberá estudiar con detenimiento las causas y magnitudes de este fenómeno para proponer una solución que mitigue o impida el mismo. Al respecto, la bibliografía consultada no ofrece herramientas analíticas que permitan cuantificar ni la velocidad de esta corriente ni la intensidad del transporte que ésta pudiera generar.

La posibilidad de que las corrientes de retorno posean una magnitud superior a la supuesta también interfiere con el normal funcionamiento del puerto, ya que es plausible que éstas aterren en cierta medida el canal de acceso al puerto, obligando a dragar con más frecuencia.

A su vez, una mayor magnitud de las corrientes de retorno puede repercutir negativamente en lo que al uso recreacional respecta. En este caso se deberá estudiar nuevamente con detenimiento la zona apta para baños, señalizándola pertinentemente.

Otro factor a monitorear es la cantidad de arena que ingresa al puerto. Esto se efectivizará mediante cartas batimétricas anuales, bajando la frecuencia en caso de no encontrar ingresos significativos. Las razones de este ingreso pueden ser variadas, inclusive estando relacionadas con el punto anterior.

Más allá de no tener mayores implicancias ambientales, es de interés monitorear este factor para evaluar el funcionamiento del espigón como se describe en 7.5.

8.5. Conclusiones

La mayor parte de las actividades de la fase de construcción son incompatibles con el uso de la playa para fines recreativos, sin embargo, de hacerse fuera de la temporada turística no interferirá significativamente con otras actividades que puedan desarrollarse. El transporte de materiales para la obra será realizado siguiendo un trayecto que minimiza las afectaciones, por lo que tampoco representará molestias mayores a la población residente.

La disminución en el uso de los pocos metros de playa que se encuentran entre el punto de emplazamiento del espigón y el puerto y de los primeros 50 metros de playa desde el espigón hacia el norte será ampliamente compensada por la mayor utilización del resto del arco de playa.

Las arenas de los dragados de mantenimiento del espigón serán dispuestas de forma amigable con el medio ambiente, recomendando su disposición final en la playa de La Aguada por recibir un nivel de energía similar a la que recibe la playa donde se localizará el espigón, por quedar a la sombra del rompeolas para la dirección de oleaje predominante y por tener una relativa lejanía a aquella. Este lugar elegido para la disposición final minimiza la arena perdida por el sistema costero y ayuda a la conservación de la franja de arena seca. Esto redundará en un cambio muy positivo en comparación con los miles de metros cúbicos anuales que se pierden actualmente.

Por otra parte, la arena dragada de dentro del puerto difícilmente podrá ser utilizada como relleno en playas con uso recreativo debido a su presumible contaminación con desechos industriales e hidrocarburos. De ser así, ésta arena se deberá sacar del sistema y disponerla de manera que retenga los contaminantes, tratando de lograr una capa de espesor considerable y así acotar el área de disposición. De todas maneras se deberán efectuar análisis de calidad de estos sedimentos de manera de tener más elementos para tomar la decisión del lugar y el método de disposición final.

Con el fin de minimizar la afectación sobre el paisaje se han seleccionado los materiales que menos lo afectan. A pesar de esto, localmente existirá una cierta afectación sobre el mismo. Esto nuevamente es compensado por la preservación de la playa, que conserva el paisaje costero.

En resumen puede decirse que el emprendimiento no presentará afectaciones negativas residuales de significancia sobre el medio. Por el contrario la construcción del mismo aportará a la preservación del medio costero, apoyando a la industria, al turismo y al desarrollo general de la zona.

Bibliografía

Bracco, Roberto y Ures, Cristina; 1998; *"Las variaciones del mar y el desarrollo de las culturas prehistóricas del Uruguay"*. Extraído de Revista do Museo de Arqueología e Etnología N°8, Universidade de Sao Paulo.

Bossi, J. y Navarro, R.; 1988; Geología del Uruguay; Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República

Canter L. W.; 1998; Manual De Evaluación de Impacto Ambiental; Ed. McGraw-Hill

Dean, R.G; Dalrymple, R.A.; 2002; Coastal Processes with Engineering Applications; Cambridge University Press

Domínguez, A.; Prieto, R.G. Coordinadores; 2000; Perfil ambiental del Uruguay/2000; Ed. Nordan-Comunidad

Grupo de Ing. de Costas-IMFIA-UdelaR; 1997; Notas de curso: Elementos de Ingeniería de Costas

Reeve D.E., (2006). "Explicit Expression for Beach Response to Non-Stationary Forcing near a Groyne." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, March-April 2006. pg. 125–132.

Silveira L.; Apuntes de clase del curso Hidrología Estadística 2005;

Silvestre, R. y Hsu, J.; 1993; Coastal Stabilization; Ed. Prentice Hall

Texeira, L., Montaña, J. y Losada, M.; *"Littoral Processes in a Prograding Coast: the Case Study of the Atlantic Ocean Coast of Uruguay"*

MTOP-PNUD-UNESCO; 1980; UNDP/URU/73/007 Conservación y mejora de playas. Informe técnico.

U.S.Army Corps of Engineers; 1987; Beneficial Uses of Dredged Material

U.S.Army Corps of Engineers; 2002; Coastal Engineering Manual (CEM)

U.S.Army Corps of Engineers; 1992; Coastal Groins and Nearshore Breakwaters

U.S.Army Corps of Engineers; 1986; Design of Breakwaters and Jetties

U.S.Army Corps of Engineers; 1983; Dredging and Dredged Material Disposal

U.S.Army Corps of Engineers; 1989; Environmental Engineering for Coastal Shore Protection

U.S.Army Corps of Engineers; 1987; Environmental Engineering for Deep-Draft Navigation Projects

Ven Te Chow; 1994; Hidrología aplicada; Ed. McGraw Hill

Wicander, R. y Monroe, J.; 2000; Fundamentos de Geología; Editorial Thompson

Anexo I

Con el fin de calcular la altura de rotura de ola y el ángulo de la misma a partir de los datos que arroja RefDif se procede de la siguiente forma:

1) Si bien RefDif modela la rotura de la ola cuando esta alcanza una relación altura-profundidad mayor a 0.78 no devuelve los nodos en los cuales se produjo la rotura. RefDif devuelve simplemente la altura de ola y el ángulo de propagación en cada uno de los puntos de la malla con la que se le definió la batimetría. A partir de esto se calcula la relación altura-profundidad (índice de rotura=H/prof) en cada nodo.

2) Se identifican los nodos que están alejados hasta 200m de la costa en las áreas de interés. Dado que los nodos distan entre si 50m entonces se tendrá que, por cada nodo que esté definiendo la costa en la zona de interés (con profundidad 0m) habrá 4 nodos aguas adentró entre los que habrá que identificar aquel en que la ola rompe. Dentro de cada conjunto de cuatro nodos se busca entonces aquel para el cual el índice de rotura es mayor y se considera que es allí donde rompe la ola. Lo que se obtiene de este modo es, para cada zona de interés, un conjunto de nodos con sus alturas y direcciones que se consideran de rotura (aunque esto es aproximado).

3) Ahora a fin de definir una altura única y una dirección única de rotura para cada zona de la costa se procede a promediar los valores encontrados. Dado que la característica que más interesa aquí es la energía que trae la ola, entonces los promedios se hacen en función de ésta:

$$H_{b\ Media} = \sqrt{\frac{\sum H_b^2}{n}}$$

Aquí Hb corresponde a la altura de rotura en cada uno de los n nodos que se toman para definir una determinada zona.
Algo similar se hace con la dirección:

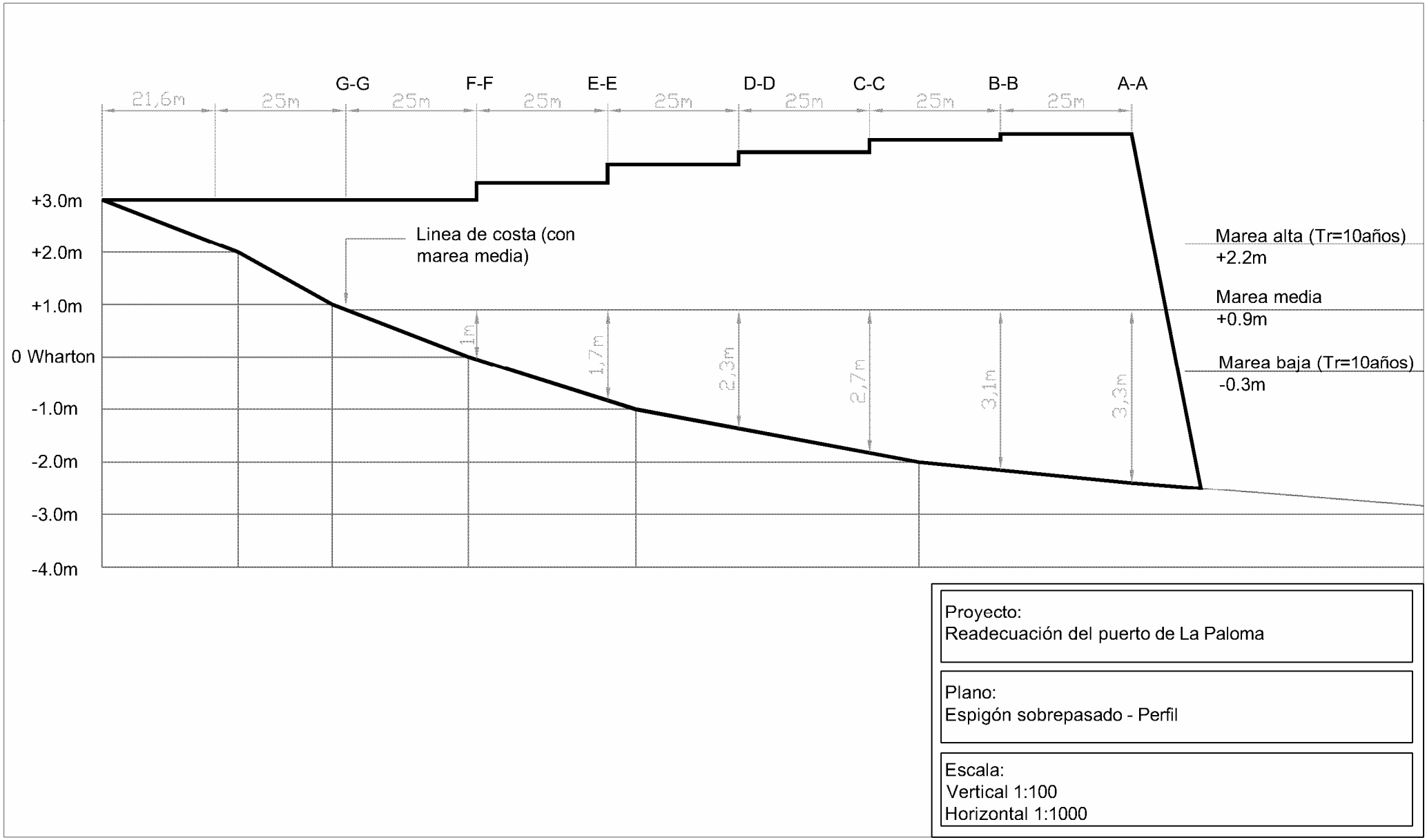
$$\theta_{b\ Medio} = \frac{\sum \theta_b H_b^2}{\sum H_b^2}$$

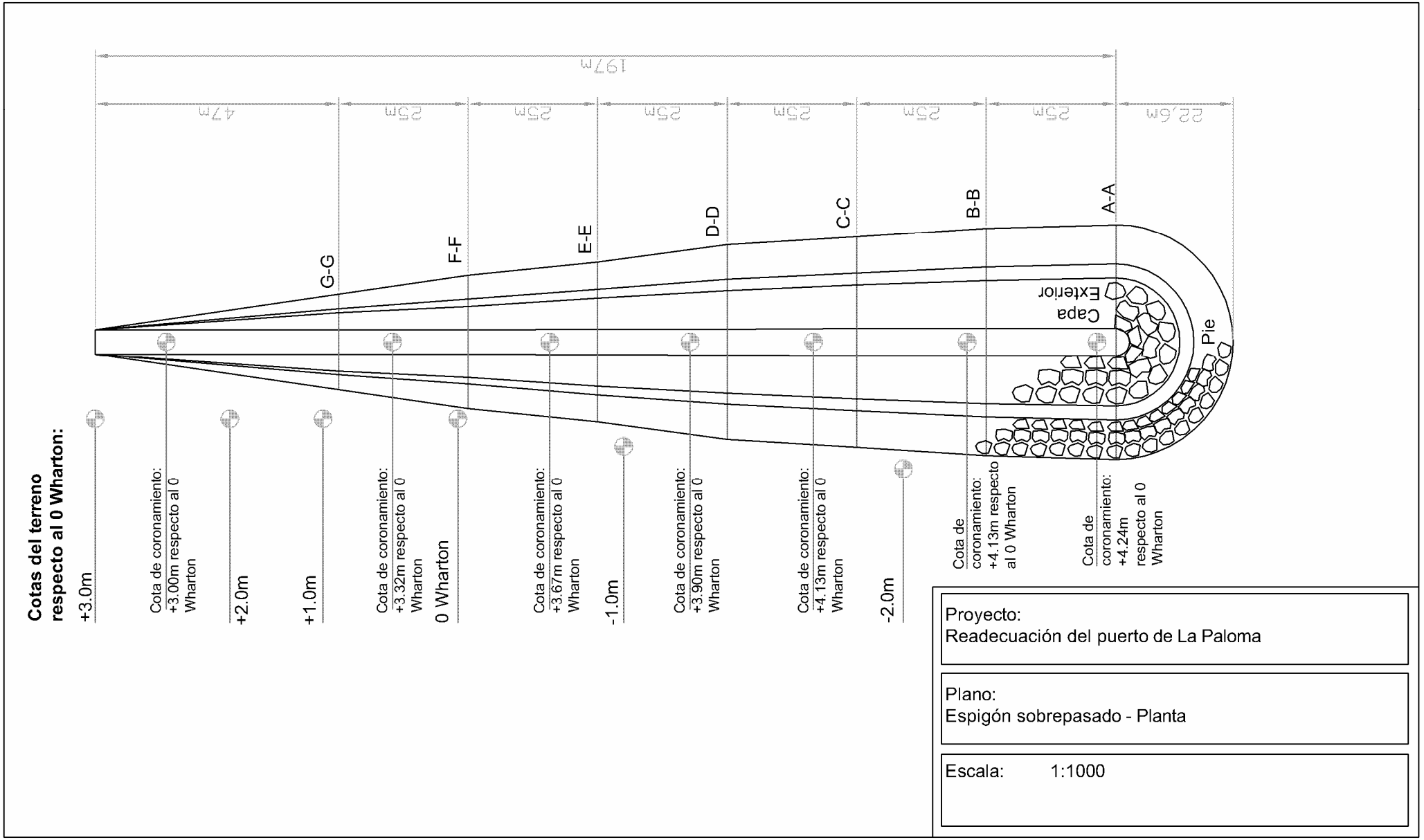
De esta forma queda definido en cada punto de interés (A, B, C, D y E) una única altura de ola de rotura y su correspondiente dirección de rotura.

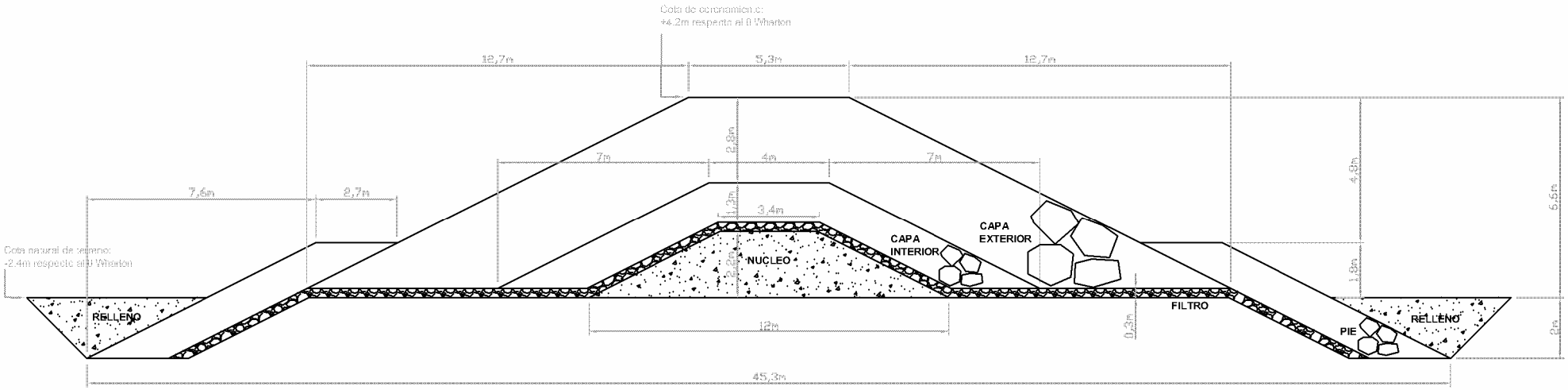
Anexo II

A continuación se presentan las figuras correspondientes al diseño del espigón sobrepasado y del espigón sumergido.

Los detalles correspondientes a la alternativa seleccionada (espigón sobrepasado) se encuentran en las piezas gráficas adjuntas al proyecto (láminas 1 a 4).


G-G
F-F
E-E
D-D
C-C
B-B
A-A
21,6m
25m
25m
25m
25m
25m
25m
25m
+3.0m
+2.0m
+1.0m
0 Wharton
-1.0m
-2.0m
-3.0m
-4.0m
Linea de costa (con marea media)
1m
1,7m
2,3m
2,7m
3,1m
3,3m
Marea alta (Tr=10años)
+2.2m
Marea media
+0.9m
Marea baja (Tr=10años)
-0.3m
Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma
Plano:
Espigón sobrepasado - Perfil
Escala:
Vertical 1:100
Horizontal 1:1000


Cotas del terreno
respecto al 0 Wharton:
+3.0m
Cota de coronamiento:
+3.00m respecto al 0
Wharton
+2.0m
+1.0m
Cota de coronamiento:
+3.32m respecto al 0
Wharton
0 Wharton
Cota de coronamiento:
+3.67m respecto al 0
Wharton
-1.0m
Cota de coronamiento:
+3.90m respecto al 0
Wharton
Cota de coronamiento:
+4.13m respecto al 0
Wharton
-2.0m
Cota de coronamiento:
+4.13m respecto
al 0 Wharton
Cota de coronamiento:
+4.24m
respecto al 0
Wharton
197m
47m
25m
25m
25m
25m
25m
25m
25m
22,6m
G-G
F-F
E-E
D-D
C-C
B-B
A-A
Capa
Exterior
Pie
Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma
Plano:
Espigón sobrepasado - Planta
Escala: 1:1000



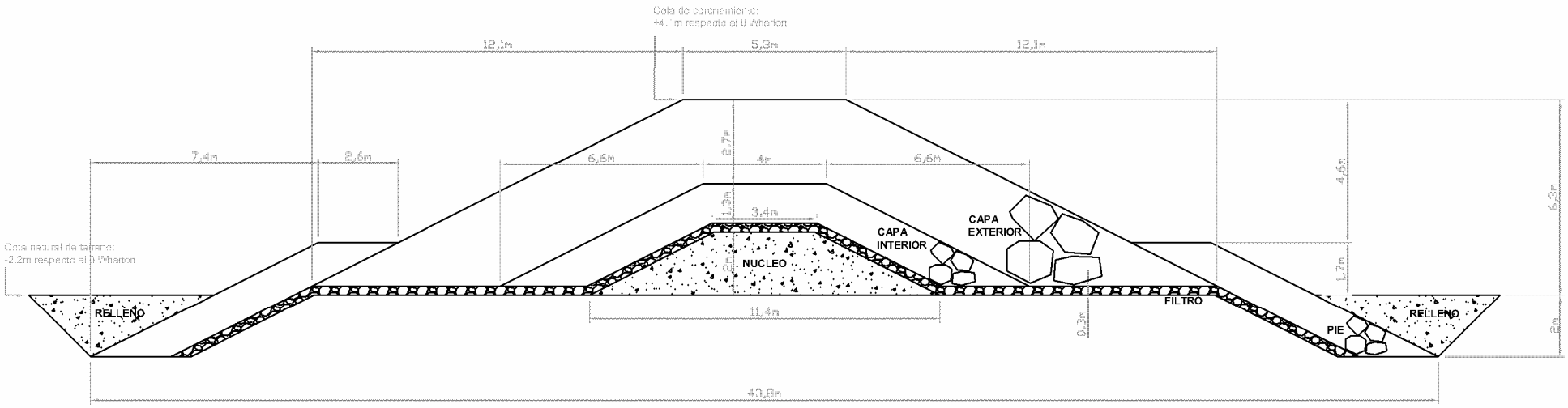
Corte A-A:

Capa exterior -> Dn50=1.42m Dmin=1.29m Dmax=1.53m
Peso med=7.46ton Peso min=5.60ton Peso max=9.30ton

Capa interior -> Dn50=0.66m Dmin=0.59m Dmax=0.72m
Peso med=746kg Peso min=520kg Peso max=970kg

Pie -> Dn50=0.90m Dmin=0.80m Dmax=0.98m
Peso med=1.90ton Peso min=1.33ton Peso max=2.47ton

Proyecto: Readecuación del puerto de La Paloma
Plano: Espigón sobrepasado - Corte A-A
Escala: 1:200



Corte B-B:

Capa exterior -> Dn50=1.36m Dmin=1.24m Dmax=1.47m
Peso med=6.60ton Peso min=4.95ton Peso max=8.25ton

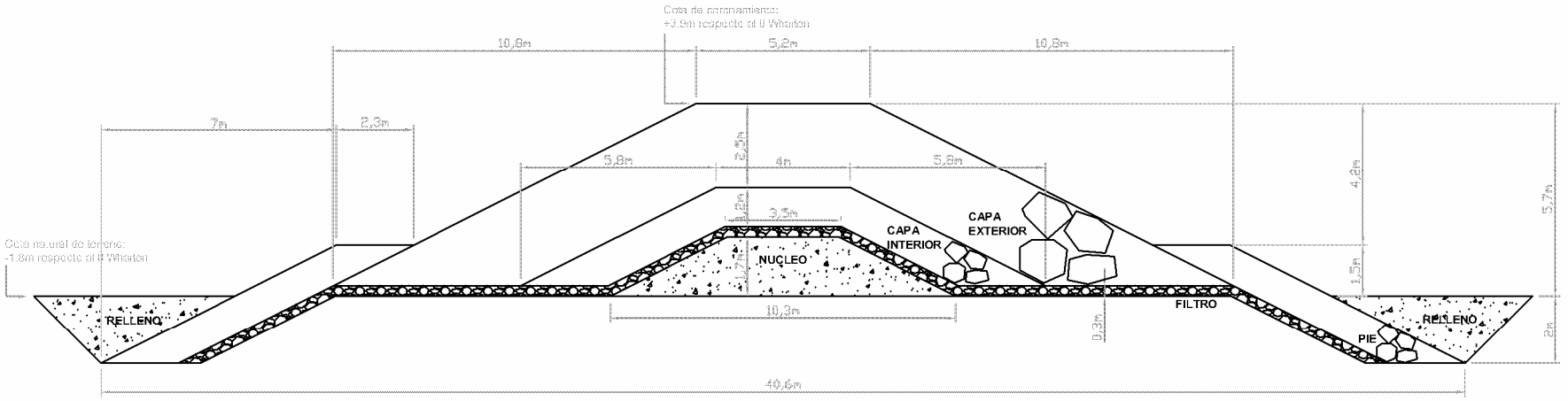
Capa interior -> Dn50=0.63m Dmin=0.56m Dmax=0.69m
Peso med=660kg Peso min=460kg Peso max=860kg

Pie -> Dn50=0.85m Dmin=0.76m Dmax=0.93m
Peso med=1.60ton Peso min=1.12ton Peso max=2.08ton

Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sobrepasado - Corte B-B

Escala: 1:200



Corte C-C:

Capa exterior -> Dn50=1.25m Dmin=1.14m Dmax=1.35m
Peso med=5.08ton Peso min=3.81ton Peso max=6.35ton

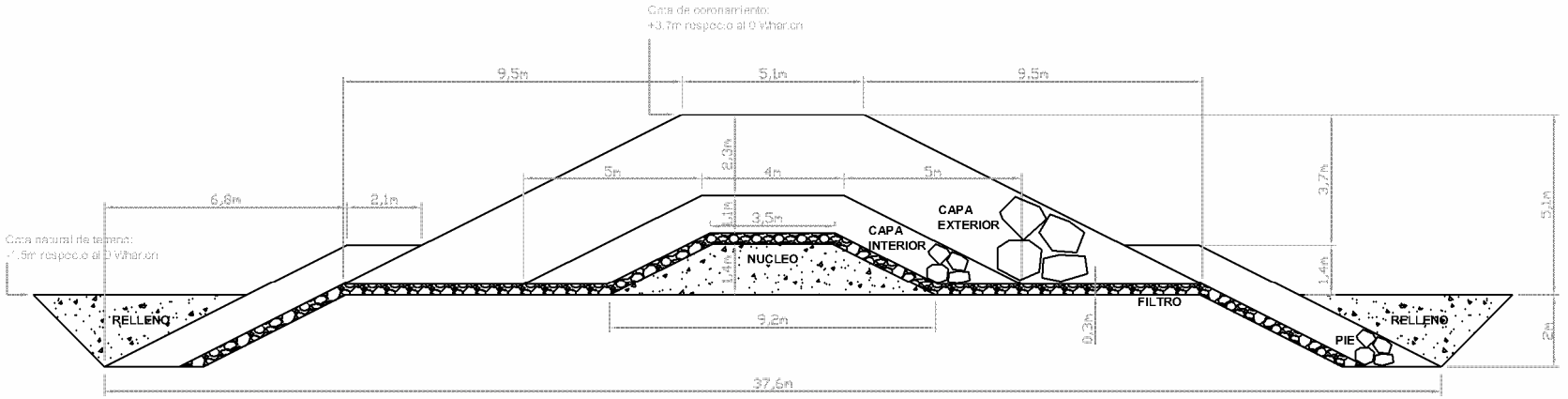
Capa interior -> Dn50=0.58m Dmin=0.52m Dmax=0.63m
Peso med=510kg Peso min=360kg Peso max=660kg

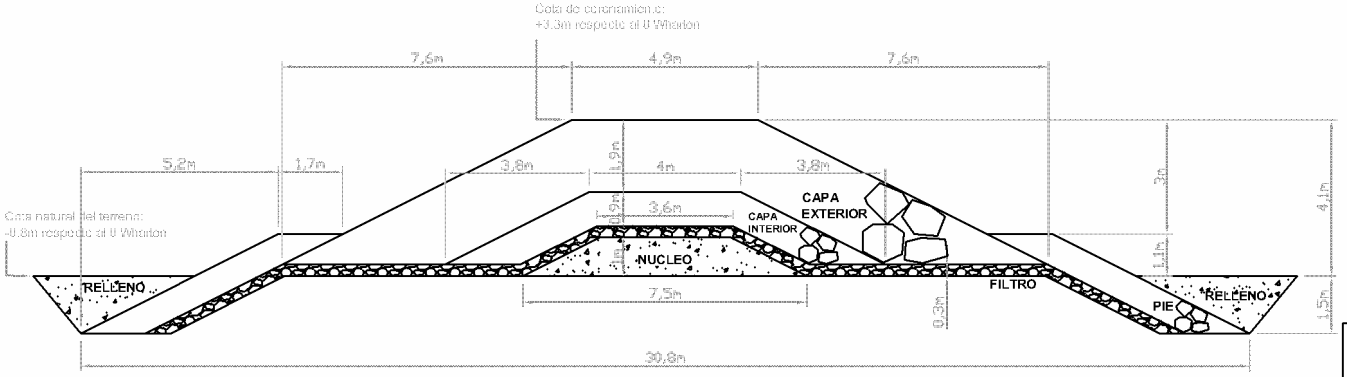
Pie -> Dn50=0.75m Dmin=0.67m Dmax=0.82m
Peso med=1.10ton Peso min=0.77ton Peso max=1.43ton

Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sobrepasado - Corte C-C

Escala: 1:200





Corte D-D:

Capa exterior -> Dn50=1.14m Dmin=1.03m Dmax=1.22m
Peso med=3.81ton Peso min=2.86ton Peso max=4.76ton

Capa interior -> Dn50=0.53m Dmin=0.47m Dmax=0.58m
Peso med=380kg Peso min=270kg Peso max=500kg

Pie -> Dn50=0.70m Dmin=0.62m Dmax=0.77m
Peso med=0.90ton Peso min=0.63ton Peso max=1.17ton

Corte E-E:

Capa exterior -> Dn50=0.96m Dmin=0.87m Dmax=1.04m
Peso med=2.31ton Peso min=1.73ton Peso max=2.89ton

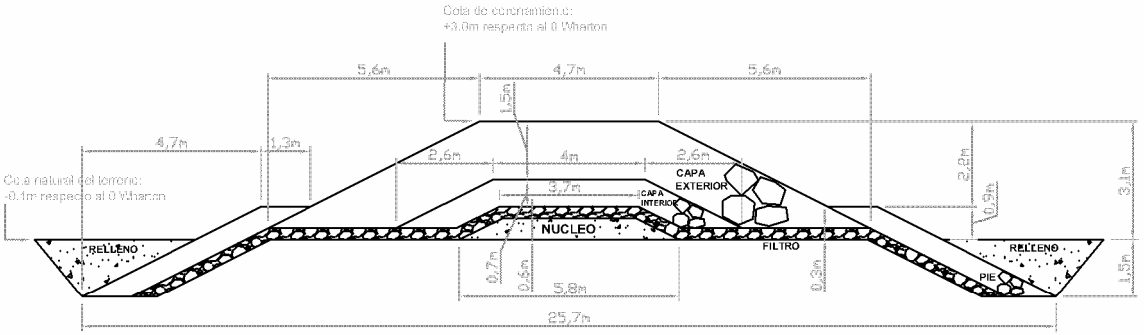
Capa interior -> Dn50=0.45m Dmin=0.40m Dmax=0.49m
Peso med=230kg Peso min=160kg Peso max=300kg

Pie -> Dn50=0.55m Dmin=0.49m Dmax=0.60m
Peso med=0.43ton Peso min=0.30ton Peso max=0.56ton

Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sobrepasado - Cortes D-D y E-E

Escala: 1:200

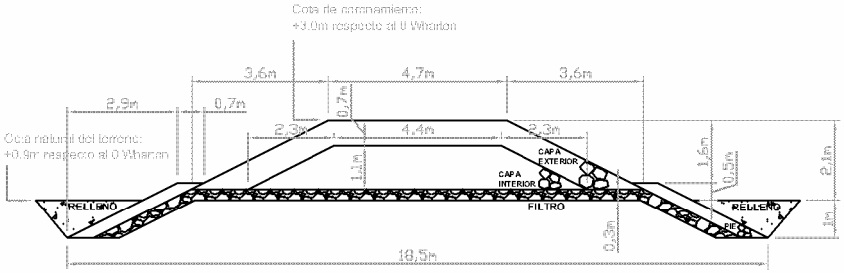


Corte F-F:

Capa exterior -> Dn50=0.76m Dmin=0.69m Dmax=0.82m
Peso med=1.15ton Peso min=0.86ton Peso max=1.44ton

Capa interior -> Dn50=0.35m Dmin=0.31m Dmax=0.39m
Peso med=115kg Peso min=80kg Peso max=150kg

Pie -> Dn50=0.43m Dmin=0.38m Dmax=0.47m
Peso med=0.21ton Peso min=0.15ton Peso max=0.27ton



Corte G-G:

Capa exterior -> Dn50=0.33m Dmin=0.30m Dmax=0.35m
Peso med=0.09ton Peso min=0.07ton Peso max=0.11ton

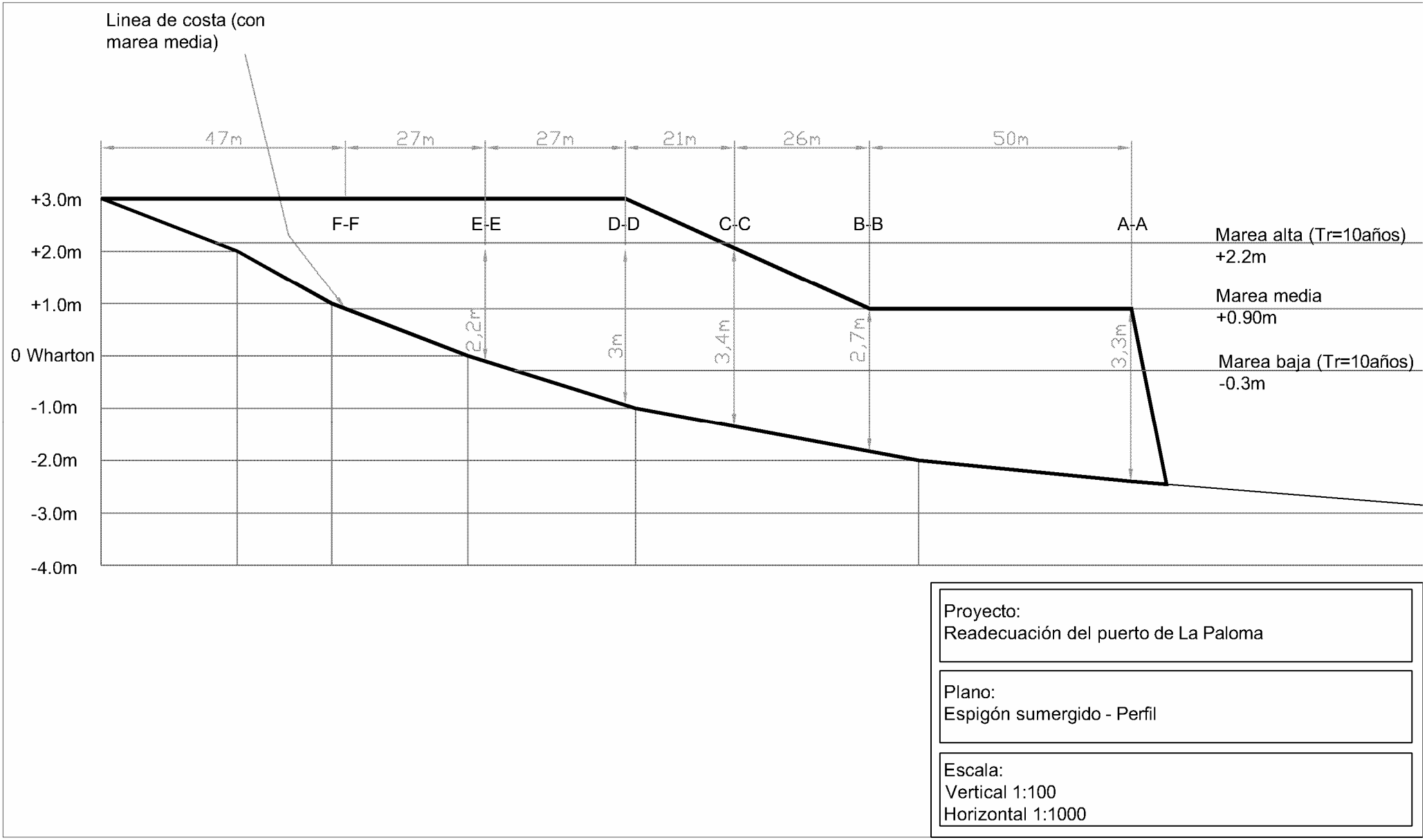
Capa interior -> Dn50=0.15m Dmin=0.13m Dmax=0.17m
Peso med=10kg Peso min=6kg Peso max=12kg

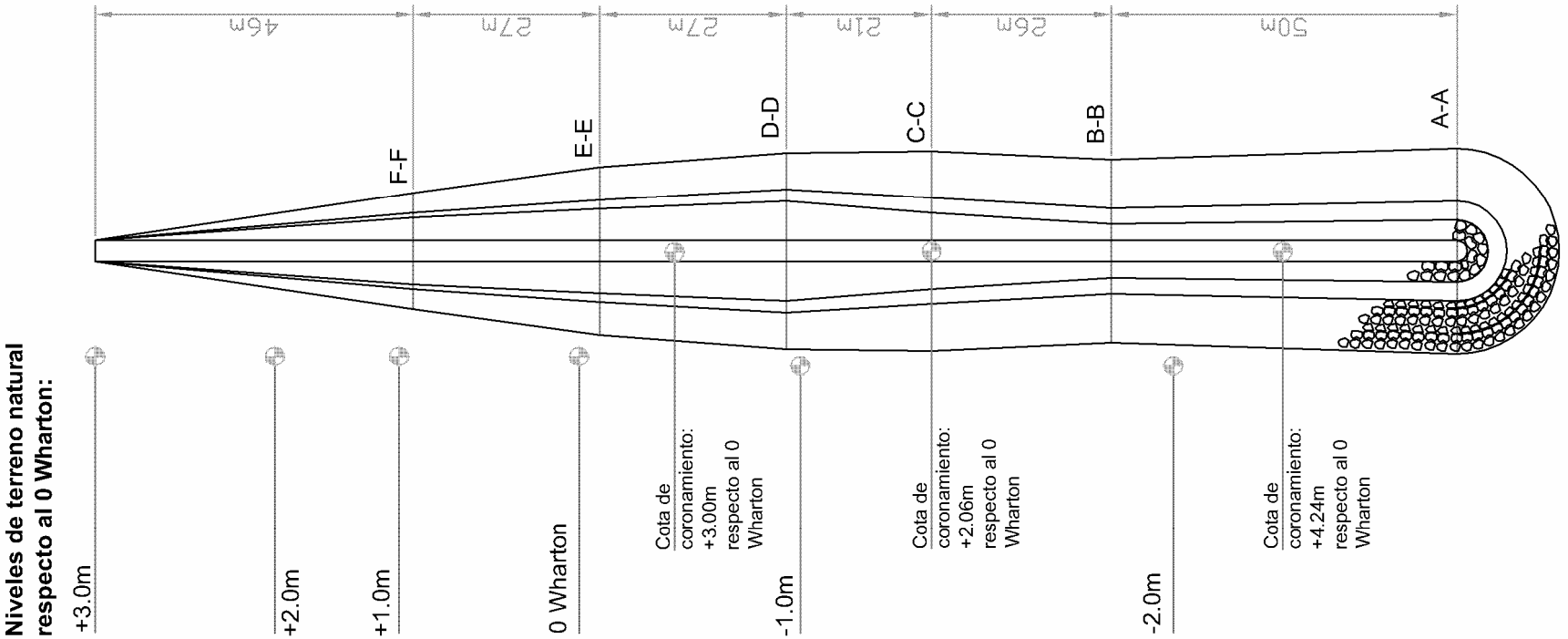
Pie -> Dn50=0.23m Dmin=0.20m Dmax=0.25m
Peso med=0.03ton Peso min=0.02ton Peso max=0.04ton

Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sobrepasado - Cortes F-F y G-G

Escala: 1:200

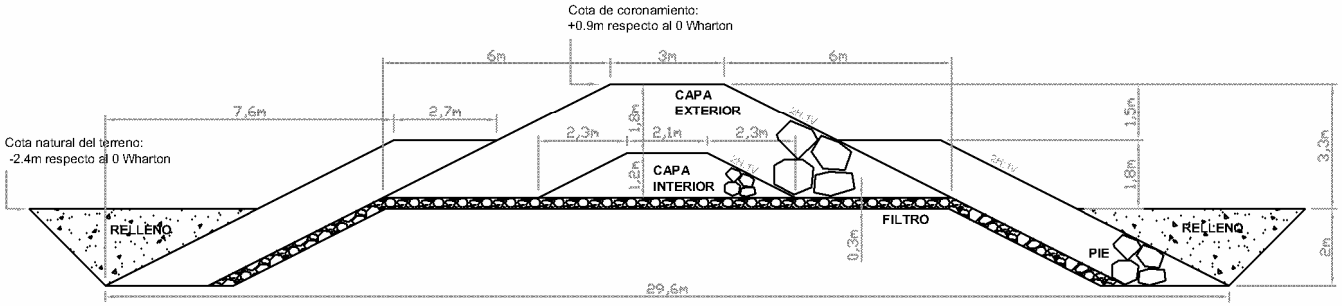

Linea de costa (con marea media)
47m
27m
27m
21m
26m
50m
+3.0m
+2.0m
+1.0m
0 Wharton
-1.0m
-2.0m
-3.0m
-4.0m
F-F
E-E
D-D
C-C
B-B
A-A
2,2m
3m
3,4m
2,7m
3,3m
Marea alta (Tr=10años)
+2.2m
Marea media
+0.90m
Marea baja (Tr=10años)
-0.3m
Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma
Plano:
Espigón sumergido - Perfil
Escala:
Vertical 1:100
Horizontal 1:1000



Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sumergido - Planta

Escala: 1:1000

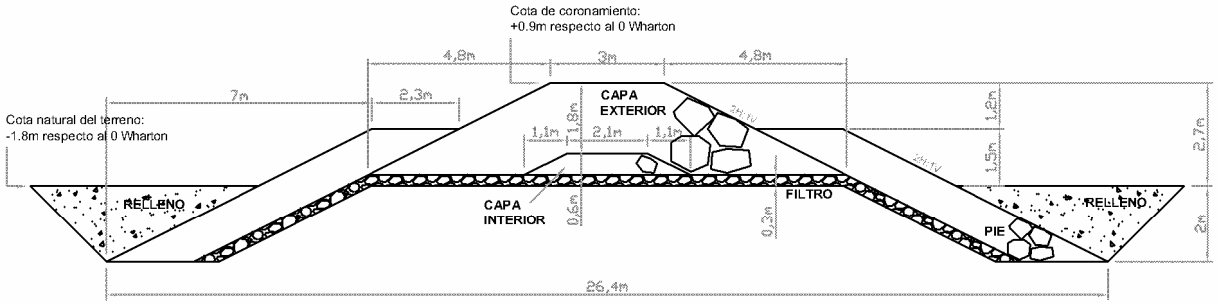


Corte A-A:

Capa exterior -> Dn50=0.92m Dmin=0.83m Dmax=0.99m
Peso med=2.00ton Peso min=1.50ton Peso max=2.50ton

Capa interior -> Dn50=0.43m Dmin=0.38m Dmax=0.46m
Peso med=200kg Peso min=140kg Peso max=260kg

Pie -> Dn50=0.90m Dmin=0.80m Dmax=0.98m
Peso med=1.90ton Peso min=1.33ton Peso max=2.47ton



Corte B-B:

Capa exterior -> Dn50=0.92m Dmin=0.83m Dmax=0.99m
Peso med=2.00ton Peso min=1.50ton Peso max=2.50ton

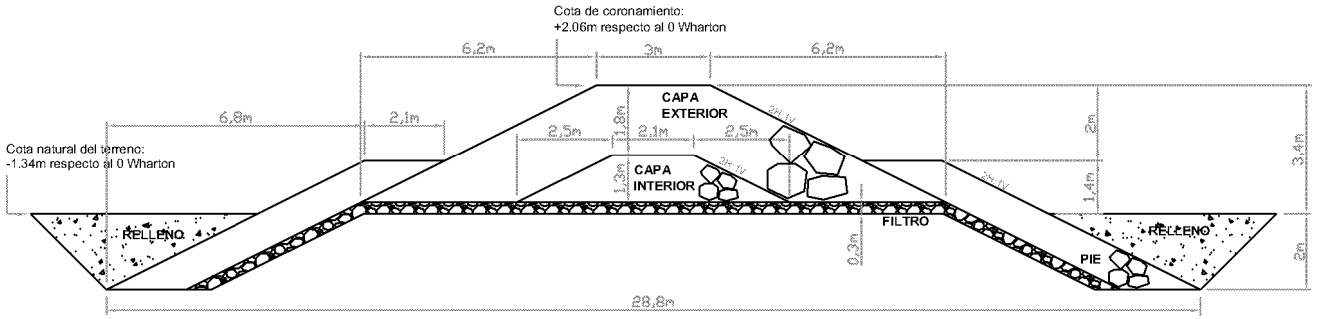
Capa interior -> Dn50=0.43m Dmin=0.38m Dmax=0.46m
Peso med=200kg Peso min=140kg Peso max=260kg

Pie -> Dn50=0.75m Dmin=0.67m Dmax=0.82m
Peso med=1.10ton Peso min=0.77ton Peso max=1.43ton

Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sumergido - Cortes A-A y B-B

Escala: 1:200

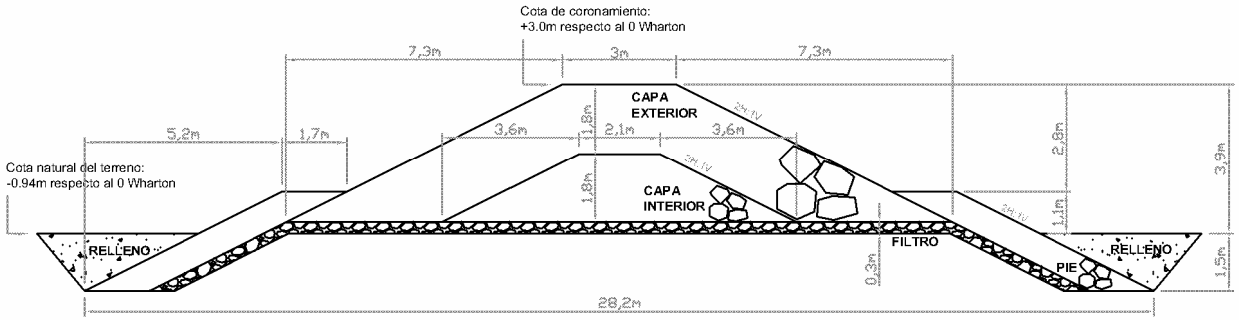


Corte C-C:

Capa exterior -> Dn50=0.92m Dmin=0.83m Dmax=0.99m
Peso med=2.00ton Peso min=1.50ton Peso max=2.50ton

Capa interior -> Dn50=0.43m Dmin=0.38m Dmax=0.46m
Peso med=200kg Peso min=140kg Peso max=260kg

Pie -> Dn50=0.70m Dmin=0.62m Dmax=0.77m
Peso med=0.90ton Peso min=0.63ton Peso max=1.17ton



Corte D-D:

Capa exterior -> Dn50=0.92m Dmin=0.83m Dmax=0.99m
Peso med=2.00ton Peso min=1.50ton Peso max=2.50ton

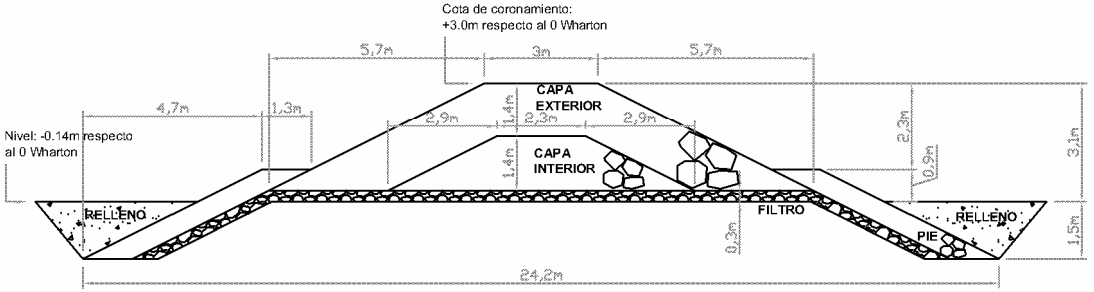
Capa interior -> Dn50=0.43m Dmin=0.38m Dmax=0.46m
Peso med=200kg Peso min=140kg Peso max=260kg

Pie -> Dn50=0.55m Dmin=0.49m Dmax=0.60m
Peso med=0.43ton Peso min=0.30ton Peso max=0.56ton

Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sumergido - Cortes C-C y D-D

Escala: 1:200

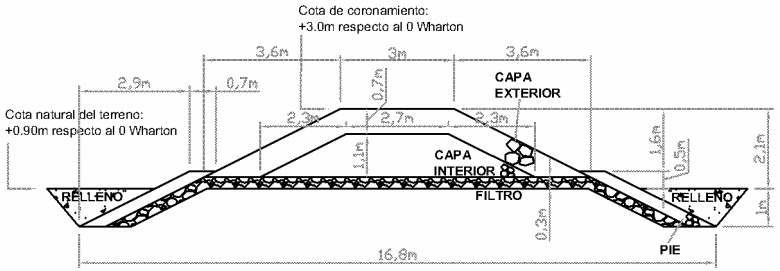


Corte E-E:

Capa exterior -> Dn50=0.70m Dmin=0.64m Dmax=0.76m
Peso med=0.90ton Peso min=0.68ton Peso max=1.12ton

Capa interior -> Dn50=0.33m Dmin=0.29m Dmax=0.36m
Peso med=90kg Peso min=63kg Peso max=117kg

Pie -> Dn50=0.43m Dmin=0.38m Dmax=0.47m
Peso med=0.21ton Peso min=0.15ton Peso max=0.27ton



Corte F-F:

Capa exterior -> Dn50=0.33m Dmin=0.30m Dmax=0.35m
Peso med=0.09ton Peso min=0.07ton Peso max=0.11ton

Capa interior -> Dn50=0.43m Dmin=0.38m Dmax=0.46m
Peso med=200kg Peso min=140kg Peso max=260kg

Pie -> Dn50=0.23m Dmin=0.20m Dmax=0.25m
Peso med=0.03ton Peso min=0.02ton Peso max=0.04ton

Proyecto:
Readecuación del puerto de La Paloma

Plano:
Espigón sumergido - Cortes E-E y F-F

Escala: 1:200

Anexo III

Las fuentes utilizadas en el cálculo de los costos son las siguientes:

- DINAMIGE – Estadísticas y laudos
- MTOP – Lista oficial de precios Enero 2006
- Curso de Costos 2005
- Contactos informales en DNH
- Contactos informales en distintas empresas constructoras
- Contactos informales en Facultad de Ingeniería