

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS
SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



PROVINCIA DEL CHUBUT
PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA
DE NUEVAS OBRAS DE ABRIGO

PARTE 2 – AGITACION EN EL INTERIOR DEL
PUERTO

Junio, 2008

Informe LHA- 273-02-08

LABORATORIO DE HIDRAULICA

PROVINCIA DEL CHUBUT
PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DE NUEVAS
OBRAS DE ABRIGO

PARTE 2 - AGITACION EN EL INTERIOR DEL
PUERTO

RESUMEN

Se presenta una evaluación de la agitación inducida por el oleaje en el puerto de Comodoro Rivadavia. Se evalúa la situación actual de configuración de obras de abrigo, y algunas variantes, lo que permitió evaluar la eficiencia de cada alternativa. Se utilizó un modelo matemático basado en la resolución de ecuaciones de tipo Boussinesq.

PALABRAS CLAVE

Olas – propagación de olas - modelación matemática – Agitación por oleaje – puertos - Comodoro Rivadavia

Informe	LHA-273-02-08
Fecha	Junio, 2008
PROYECTO	652
COMITENTE	Provincia del Chubut Dirección General de Infraestructura

**INA
LABORATORIO DE HIDRAULICA**

DIRECTOR

Ing. J.C. De Lio

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

Ing. R. D. Castellano

Informe producido por

Ing. N. Tomazin

Equipo de trabajo

*Ing. N. Tomazin
Sr. C.A. Haspert
Sr. S.L. Peralta*

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	METODOLOGIA.....	4
4	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO	5
5	APLICACIÓN DEL MODELO EN EL PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA ..	6
5.1	Grilla de cálculo.....	6
5.2	Condiciones de contorno	7
5.3	Escenarios de cálculo.....	8
5.4	Selección de puntos de control	9
5.5	Resultados de las simulaciones.....	10
6	EVALUACION DE ALTERNATIVAS PARA LA CONFIGURACIÓN DE LA PLANTA PORTUARIA	12
6.1	Etapa 1	13
6.2	Etapa 2	19
6.3	Etapa 3	27
7	ANALISIS EN DETALLE DE LA CONFIGURACION SELECCIONADA	35
7.1	Escenarios de cálculo analizados.....	35
7.2	Resultados.....	37
7.3	Reducción de la agitación respecto del la configuración actual	39
7.4	Influencia de la marea.....	40
7.5	Sensibilidad a las propiedades reflejantes	43
8	CONCLUSIONES FINALES	51
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

Anexo I: Descripción del Modelo BOUSS2D

Anexo II: Planta Portuaria Actual

Anexo III Resultados de agitación por oleaje para la planta portuaria actual

Anexo IV Agitación por oleaje para las alternativas de obra de abrigo

Anexo V Agitación por oleaje para la configuración final

PROVINCIA DEL CHUBUT
PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA DE
NUEVAS OBRAS DE ABRIGO

PARTE 2 – AGITACION EN EL INTERIOR DEL PUERTO

Junio, 2008

1 INTRODUCCION

La Dirección General de Infraestructura Portuaria (D.G.I.P.) de la Provincia del Chubut ha encomendado al Instituto Nacional del Agua (I.N.A.) la evaluación funcional desde el punto de vista hidráulico, de un proyecto de ampliación de las obras de abrigo al Puerto de Comodoro Rivadavia.

La D.G.I.P. tiene como necesidad a cumplimentar con este proyecto los siguientes objetivos:

- Disminuir la agitación en la dársena pesquera, considerando además que está en marcha una nueva ampliación del muelle pesquero en un total de 56 m.
- Reducir la agitación frente al muelle de ultramar, para oleajes en régimen medio, ya que se ha observado una excesiva agitación durante las operaciones.
- Generar una zona de calma en una posible área destinada al atraque de cruceros.

Las tareas se han desarrollado bajo los términos del Acta Complementaria 6 al Convenio Marco de Cooperación e Investigación suscripto con fecha 8 de Agosto de 2002, cuya vigencia ha sido renovada por cinco años el 9 de agosto de 2007.

La caracterización del clima de olas en el área costera próxima al Puerto de Comodoro Rivadavia, etapa inicial de las tareas desarrolladas, ha sido incorporada en la **Parte I** del presente estudio (Informe **LHA-273-01-08**).

Los objetivos y metodología para el desarrollo del trabajo se detallan en los **Capítulos 2 y 3** respectivamente.

En el **Capítulo 4** se presenta una breve descripción de las características del modelo matemático aplicado a la resolución del problema de agitación portuaria.

En el **Capítulo 5** se presenta la implementación del modelo al caso del puerto de Comodoro Rivadavia en la actual configuración de obras, los escenarios escogidos para la evaluación y los resultados correspondientes.

En el **Capítulo 6** se evalúan preliminarmente un conjunto de alternativas de ampliación de obras de abrigo.

En el **Capítulo 7** se presenta la evaluación de detalle de la configuración de obra de abrigo escogida.

2 OBJETIVOS

Las tareas desarrolladas tuvieron como objetivo final la evaluación funcional desde el punto de vista hidráulico de un proyecto de obras de abrigo complementarias en el Puerto de Comodoro Rivadavia.

El estudio se desglosó en dos etapas, de las cuales esta es la segunda. La primera parte consistió en la caracterización del clima de olas en el área costera próxima. (*Provincia del Chubut, Puerto de Comodoro Rivadavia. Estudio Mediante Modelación Matemática de Nuevas Obras de Abrigo. Parte 1 – Clima de Olas. LHA-273-01-08, Junio, 2008*)

En el presente informe se presentan los resultados de la evaluación de algunas alternativas de obra de abrigo desarrolladas por la D.G.I.P., analizándose en mayor profundidad aquella que fue considerada más eficiente.

3 METODOLOGIA

En líneas generales, se mencionan las diferentes etapas que conforman la metodología aplicada para el desarrollo de la totalidad de los estudios. En la **Parte I - Clima de Olas**:

- Búsqueda y análisis de la información de base.
- Evaluación del clima de olas en aguas profundas.
- Definición de condiciones oceanográficas medias y extremas.
- Definición de escenarios para las simulaciones numéricas.
- Aplicación del modelo numérico para la modelación de la propagación del oleaje hasta el área costera.
- Determinación del clima de olas en el entorno del emplazamiento del puerto.

En la **Parte II**, cuyos contenidos se desarrollan en el presente informe, se exponen los siguientes aspectos:

- Modelación matemática de la agitación por oleaje en el área portuaria, tanto en situación actual como con las nuevas obras proyectadas.
- Optimización del proyecto de las obras de abrigo.

El desarrollo de un estudio de este tipo demandó la aplicación de técnicas numéricas avanzadas que permitan encarar la solución de problemas matemáticamente complejos. Dado este contexto, para el desarrollo del estudio solicitado en el Puerto de Comodoro Rivadavia se aplicó el modelo BOUSS-2D (Ref. [1]), el cual es considerado especialmente apto para este propósito y dada su versatilidad permitió estudiar los efectos de distintas modificaciones geométricas para la configuración portuaria sobre las características de la agitación interna del puerto.

4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO

La modelación de la agitación interior de un puerto producida por acción de las olas requiere la consideración de procesos físicos lineales y no lineales generados por la acción combinada de una excitación exterior (oleaje) y la presencia de estructuras portuarias con determinadas características geométricas y propiedades reflejantes o absorbentes de la energía.

BOUSS-2D es un modelo numérico perteneciente al sistema SMS (Surface-Water Modeling System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. El mismo se encuentra basado en una solución dominio-tiempo de ecuaciones tipo Boussinesq.

La forma clásica de las ecuaciones de Boussinesq para la propagación del oleaje en aguas de profundidad variable fue derivada por Peregrine (1967). La aplicación de estas ecuaciones se encuentra restringida a zonas de aguas relativamente poco profundas dado que se asume que una variación cuadrática para el perfil de velocidades verticales.

El planteamiento original de estas ecuaciones ha sido reformulado por Nwogu (1993, 1996) y por Wei et al. (1995), permitiendo extender el rango de aplicabilidad de las mismas al incorporar los efectos de la mayoría de los procesos físicos asociados a la transformación del oleaje que resultan de interés para el campo de la ingeniería de puertos y costas, entre los que podemos mencionar:

- *Bajío.*
- *Refracción.*
- *Difracción.*
- *Reflexión parcial o total.*
- *Fricción de fondo.*
- *Interacción no lineal entre distintas componentes de onda.*
- *Rompimiento de olas y Run-up.*
- *Corrientes inducidas por acción del oleaje.*
- *Interacción entre olas y corrientes.*

En el **ANEXO I** de este informe puede encontrarse una descripción ampliada de las características de este modelo.

5 APLICACIÓN DEL MODELO EN EL PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

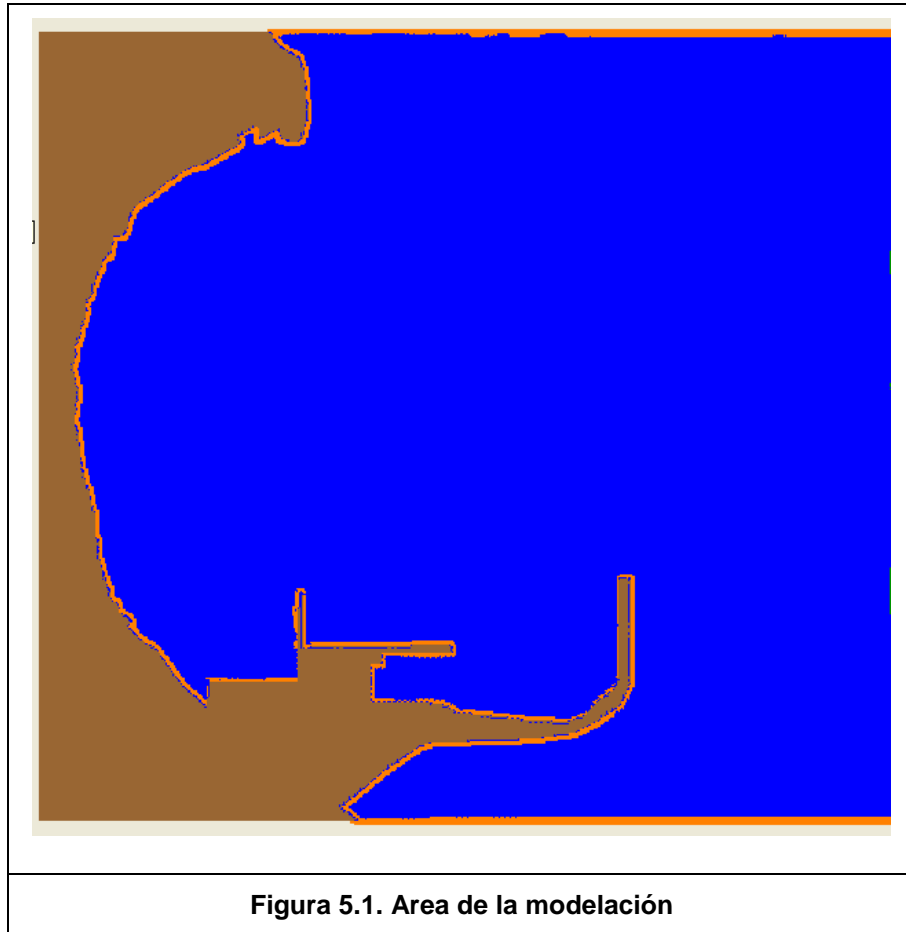
En la primera parte de este estudio el modelo fue aplicado para analizar la agitación inducida por el oleaje en la configuración actual del Puerto de Comodoro Rivadavia. Los resultados obtenidos en esta aplicación fueron utilizados posteriormente para realizar las comparaciones que permitirán evaluar la eficiencia de distintas configuraciones alternativas propuestas para mejorar las condiciones de operación en el puerto.

La implementación de modelo requiere básicamente de la definición del área a modelar, la elección de una resolución para la discretización espacial (Δx , Δy) y la construcción de una malla o grilla de cálculo, y de un paso temporal Δt . En segunda instancia es necesario definir las propiedades de los contornos y los escenarios hidrodinámicos que constituyen las condiciones de borde.

5.1 Grilla de cálculo

Para la construcción de las grillas de cálculo necesarias para la aplicación del modelo se utilizó la información batimétrica provista por la DGIP, consistente en relevamientos de detalle realizados en la zona de estudio, descriptos en la Parte I de este estudio. La figura del **ANEXO II** muestra un esquema de la configuración actual de la planta del Puerto de Comodoro Rivadavia.

El área modelada para este estudio abarca una superficie del orden de 4.9 km², discretizada en un grilla regular constituida por un total de 425 X 461 nodos, separados entre si por una distancia $\Delta x = \Delta y$ de 5 m, lo cual brinda una resolución espacial adecuada para encarar la solución del problema planteado. La **Figura 5.1** muestra la grilla de cálculo confeccionada para la aplicación del modelo, permitiendo observar la totalidad del área modelada.



5.2 Condiciones de contorno

Los bordes laterales del modelo (bordes “oceánicos”) fueron considerados como fronteras totalmente absorbentes, permitiendo de esta manera el egreso del sistema de la energía reflejada por la presencia de las estructuras portuarias y la costa.

Para los contornos interiores del puerto y la costa se consideraron diferentes condiciones de reflexión, expresados en el modelo a través del coeficiente de amortiguamiento α , en este caso se utilizaron los siguientes valores:

- Zona de playa: $\alpha=0.8$ (altamente absorbente)
- Escollera (enrocado): $\alpha=0.5$ (parcialmente reflejante)

- Sector de muelles $\alpha=0.1$ (altamente reflejante)

Para la adopción de estos valores se tuvieron en cuenta las observaciones realizadas en una visita de reconocimiento al lugar, como así también distintas recomendaciones bibliográficas y experiencias previas obtenidas en trabajos similares (ver **Apartado 7.5**).

5.3 Escenarios de cálculo

Los resultados obtenidos en el análisis previo del clima de olas en la región (Parte I) permitieron seleccionar un conjunto de escenarios de cálculo los que fueron utilizados como dato de entrada para la modelación matemática destinada a evaluar las características de la agitación interior producidas por la interacción entre las estructuras portuarias y olas ingresantes al recinto con diferentes valores de altura, período y dirección.

Con el propósito de modelar un conjunto de situaciones que pudieran resultar comprometidas para el puerto y al mismo tiempo mantener acotado el número de ensayos numéricos, dado el elevado tiempo de cálculo que insume cada una de las simulaciones, se seleccionaron tres escenarios básicos. Los mismos estuvieron asociados a condiciones de temporales frecuentes extraídos de las estadística de olas para un punto costero (punto A, Parte I). La selección de esos escenarios tuvo en cuenta la orientación de las obras de abrigo, y resultaron caracterizados por los siguientes valores:

Tabla 5.1. Escenarios de cálculo

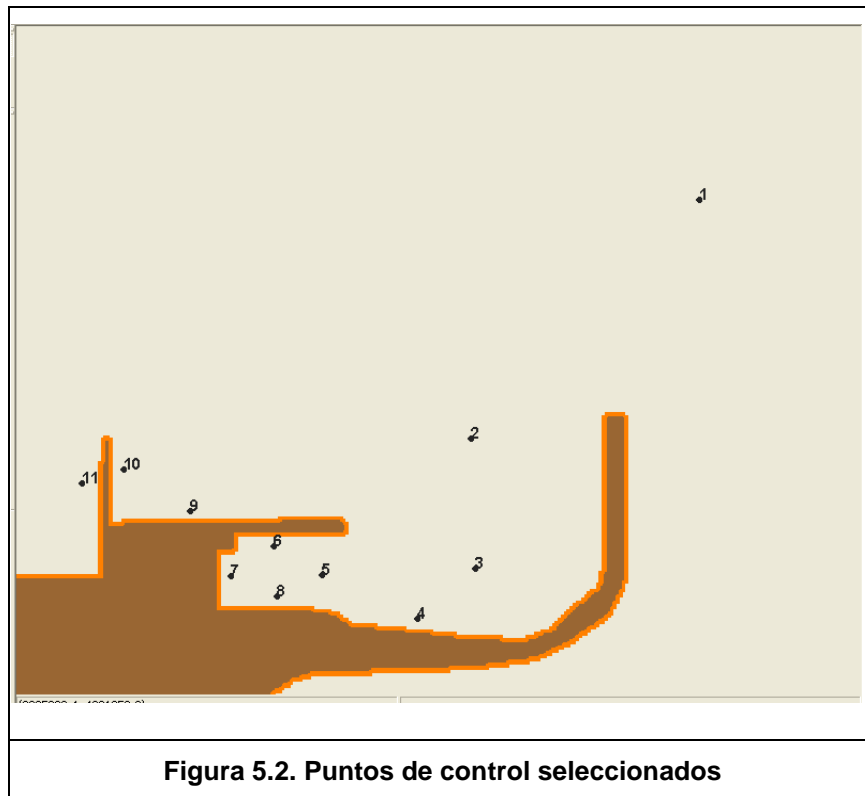
Escenario	Hs (m)	Tp (s)	Dirección	Casos observados
1. Swell E	2.0	12	90°	17 casos en 10 años
2. Viento ENE	2.0	6	60°	21 casos en 10 años
3. Swell ENE	0.70	15	67.5°	12 casos en 10 años

En todos los casos, los valores presentados para H, Tp y dirección, corresponden a una ubicación cercana a la boca de acceso al puerto, donde la profundidad natural es del orden de los 11 m, y que es coincidente con la zona definida como borde de la modelación desde la cual se propagan las olas hacia la costa y el interior del puerto.

La dirección de propagación se encuentra medida desde el Norte en sentido horario y desde donde provienen las olas, es decir que a las olas procedentes del Este les corresponde un ángulo de 90° y a las procedentes del Sur 180° . Para la totalidad de las simulaciones realizadas se consideró el nivel medio de la marea correspondiente a $NM = 2.6$ m según el plano de referencia MOP.

5.4 Selección de puntos de control

Para facilitar la evaluación de los resultados surgidos de la aplicación del modelo y poder analizar las características de la agitación en distintos sectores del puerto, se seleccionó un conjunto de puntos de control, ubicados tanto en el interior como en el exterior del recinto portuario, los cuales permitieron obtener valores puntuales de altura significativa del oleaje para los distintos escenarios analizados. La **Figura 5.2** muestra la ubicación del conjunto de puntos seleccionados para dicho propósito.



5.5 Resultados de las simulaciones

Cada uno de los escenarios presentados en el apartado anterior fue objeto de una simulación numérica. Para cada aplicación del modelo, los espectros de energía del oleaje correspondiente fueron representados por la función de JONSWAP, y en cada caso se modificó convenientemente el paso temporal para el avance de la simulación de manera tal de controlar la estabilidad del cálculo. Dada la discretización espacial de la grilla, y en función de los diferentes escenarios simulados (distintas celeridades de onda), los valores de Δt asociados al cálculo se mantuvieron en el orden de entre 0.15 y 0.20 s.

Los resultados de la aplicación del modelo son presentados en la **Tabla 5.2**, donde pueden observarse los valores de H_s (m) correspondientes a los puntos de control seleccionados, obtenidos para cada uno de los escenarios simulados.

Las **Figuras A-III.1 a A-III.3**, ubicadas en el **ANEXO III**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada.

Tabla 5.2. Resultado de la modelación. Valores de H_s (m)

Punto	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
	Swell E	Veinto ENE	Swell ENE
1	2.16	1.89	0.68
2	0.75	1.54	0.51
3	0.19	0.19	0.14
4	0.18	0.22	0.10
5	0.34	0.69	0.29
6	0.14	0.11	0.10
7	0.18	0.18	0.10
8	0.24	0.61	0.20
9	0.75	2.10	0.73
10	1.4	1.95	1.02
11	0.42	0.39	0.33

Estos resultados indican un nivel de agitación elevado en algunas ubicaciones puntuales del área modelada. En particular, los puntos 5 (ingreso a la dársena de servicio) y 8 (muelle pesquero) presentan valores de H_s superiores al umbral de admisibilidad dado por la norma

ROM 3.1-99, en la cual se señala el límite de 0.4 m para la paralización de las operaciones de carga y descarga para embarcaciones de pesca fresca.

Por otra parte, en el exterior de la dársena de servicio, la zona comprendida entre los muros Norte y Oeste (puntos 9 y 10), muestra valores de agitación excesivamente elevados. Esto se debe, en parte, al escaso abrigo de este sector y la consecuente posibilidad de incidencia directa del oleaje, pero además, se encuentra asociado a las propiedades altamente reflejantes de los muros del contorno, lo cual origina en agravamiento de esta situación.

Los resultados de las simulaciones realizadas muestran la importancia de la realización de obras complementarias de abrigo para el puerto que permitan reducir los niveles de agitación, ya sea para mejorar las condiciones de operación en el sector de la Dársena de Servicio y el Muelle de Ultramar, como así también para generar la posibilidad de ampliar la zona de aguas abrigadas.

Los escenarios seleccionados para este análisis fueron utilizados posteriormente en la aplicación del modelo para el estudio de diferentes alternativas de configuración de la planta portuaria, por lo cual, los resultados presentados en la **Tabla 5.2** sirvieron para cuantificar la eficiencia en la atenuación del oleaje de las distintas alternativas evaluadas.

6 EVALUACION DE ALTERNATIVAS PARA LA CONFIGURACIÓN DE LA PLANTA PORTUARIA

La factibilidad técnica de modificar la configuración actual de la planta portuaria de Comodoro Rivadavia requiere en primera instancia de la evaluación de la alteración en las condiciones de agitación interior debido al cambio de las obras de abrigo que interactúan con el oleaje.

Consecuentemente, y a requerimiento de la DGIP, se realizó en el marco de este estudio una evaluación sobre este aspecto para distintas alternativas de modificación contemplando tanto la posibilidad de prolongación de las obras de abrigo actuales, como la construcción de nuevas estructuras independientes de protección para el puerto.

El proceso de estudio de las alternativas, y la selección final de las más conveniente, contempló no sólo el análisis de la agitación inducida por el oleaje desarrollado por parte del INA, sino también, requirió de la evaluación por parte de la DGIP de diferentes aspectos referidos a cada tipo de obra, como lo son la valoración de costos, aspectos constructivos, afectación a la actividad portuaria, y otros. Por tal motivo, el desarrollo de este proceso demandó la interacción entre ambas partes conforme a como fueron presentándose los resultados de las distintas evaluaciones.

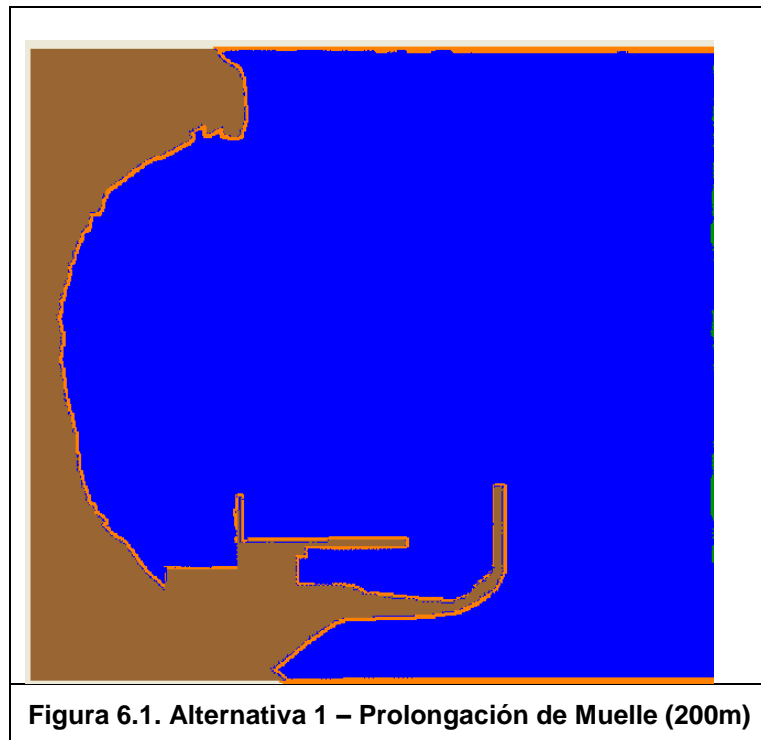
En esta sección del informe se presenta el desarrollo del proceso de evaluación de las distintas alternativas referido al aspecto de la atenuación de la agitación. Dicho proceso es presentado en tres etapas siguiendo cronológicamente el desarrollo de la tarea de evaluación de las alternativas y de selección final.

6.1 Etapa 1

Esta etapa tuvo el propósito de observar el funcionamiento hidráulico, desde el punta de vista de la atenuación del oleaje, de tres tipologías bien diferenciadas para la configuración de la planta portuaria. Específicamente, se buscó obtener una primera valoración de los beneficios que pudieran generar para la actividad del puerto la realización de obras tales como: **a)** la prolongación del Muro Norte, **b)** la construcción de un dique exento, o **c)** la prolongación de la Escollera actual. Consecuentemente, en esta etapa se analizaron las siguientes alternativas de proyecto:

- Prolongación del Muro Norte (L=200 m) para el cierre de la dársena de servicio.
- Construcción de un dique exento paralelo al Muelle de YPF (L=300m).
- Prolongación de la escollera actual en una longitud de L=200 m y una inclinación de $\theta = 30^\circ$.

Las configuraciones propuestas para esta etapa de la evaluación son presentadas en las **Figuras 6.1 a 6.3**, donde se muestran las tres grillas de cálculo correspondientes, las cuales



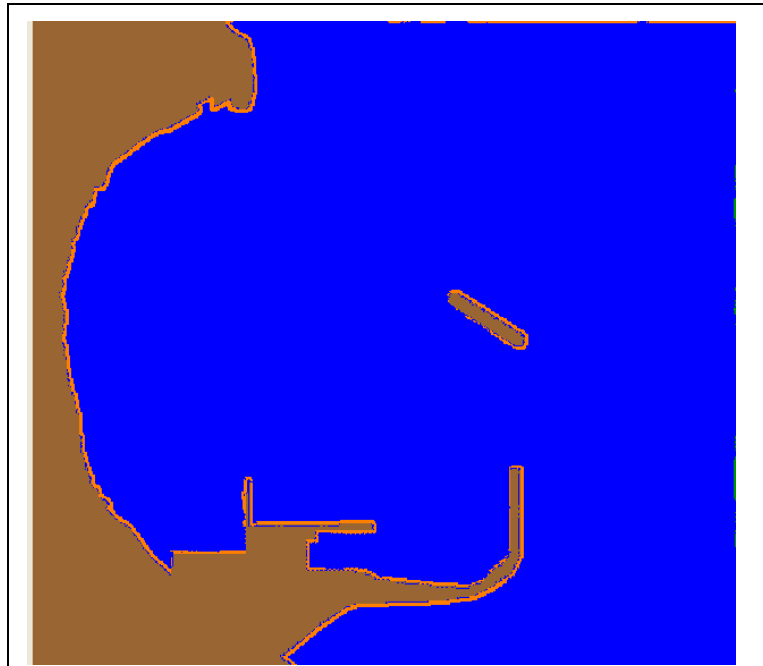


Figura 6.2. Alternativa 2 – Dique Exento (L=300 m)

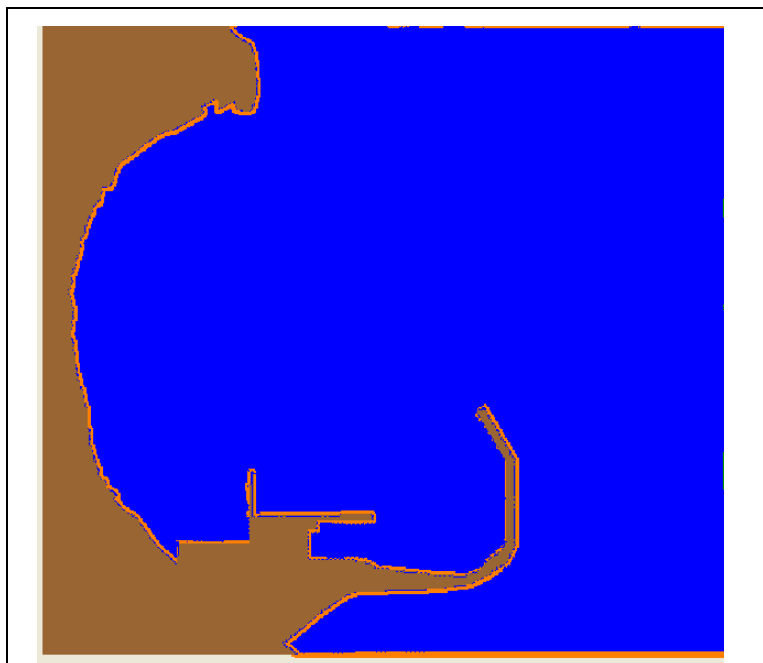


Figura 6.3. Alternativa 3 – Escollera inclinada (L=200 m)

fueron construidas de igual forma que para el caso de la configuración actual y presentan idénticas características para la modelación.

Para la realización de estos ensayos numéricos se repitieron las mismas condiciones de simulación utilizadas para la configuración actual; considerándose las mismas propiedades reflejantes para los contornos (coeficientes de amortiguamiento), los mismos escenarios de cálculo (**Tabla 6.1**), y adoptando los mismos puntos de control para la evaluación de los resultados.

Coefficientes de amortiguamiento para los contornos:

- Zona de playa: $\alpha=0.8$ (altamente absorbente)
- Escollera y dique exento (enrocado) $\alpha=0.5$ (parcialmente reflejante)
- Sector de muelles $\alpha= 0.1$ (altamente reflejante)

Tabla 6.1. Escenarios de cálculo

Escenario	Hs (m)	Tp (s)	Dirección	Casos observados
1. Swell E	2.0	12	90°	17 casos en 10 años
2. Viento ENE	2.0	6	60°	21 casos en 10 años
3. Swell ENE	0.70	15	67.5°	12 casos en 10 años

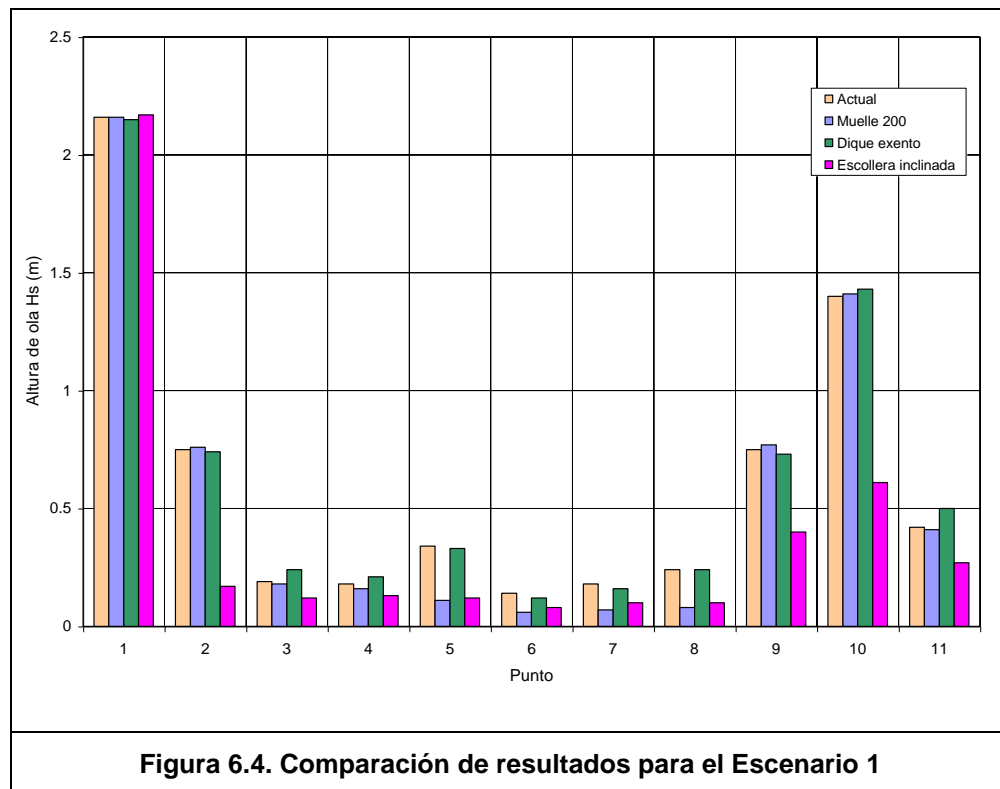
Bajo estas condiciones, se obtuvieron los resultados presentados en la **Tabla 6.2**, donde se observan los valores de Hs (m) correspondientes a los puntos de control seleccionados para cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla 6.2. Valores de Hs (m) en cada punto para los tres escenarios analizados

Punto	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	Muelle200	Exento	Inclinada	Muelle200	Exento	Inclinada	Muelle200	Exento	Inclinada
1	2.16	2.15	2.17	1.89	1.90	1.88	0.68	0.68	0.68
2	0.76	0.74	0.17	1.55	1.67	0.13	0.50	0.47	0.09
3	0.18	0.24	0.12	0.19	0.26	0.05	0.12	0.17	0.06
4	0.16	0.21	0.13	0.23	0.30	0.06	0.10	0.10	0.05
5	0.11	0.33	0.12	0.07	0.78	0.10	0.10	0.26	0.08
6	0.06	0.12	0.08	0.02	0.12	0.03	0.04	0.09	0.03
7	0.07	0.16	0.10	0.03	0.20	0.02	0.03	0.09	0.03
8	0.08	0.24	0.10	0.08	0.66	0.06	0.07	0.17	0.05
9	0.77	0.73	0.40	2.09	2.06	0.89	0.72	0.76	0.31
10	1.41	1.43	0.61	1.98	1.18	1.72	1.03	0.98	0.47
11	0.41	0.50	0.27	0.40	0.08	0.47	0.31	0.16	0.25

Las **Figuras A-IV.1 a A-IV.3**, ubicadas en el **ANEXO IV**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada en las tres configuraciones para el caso del Escenario 2.

Por otra parte, en las **Figuras 6.4 a 6.6**, los gráficos de barras construidos con los valores de H_s (m) correspondientes a los puntos de control seleccionados permiten comparar los resultados obtenidos para la configuración actual y para las alternativas propuestas. De este modo se puede tener una primera apreciación de la atenuación en la agitación para las diferentes configuraciones estudiadas.



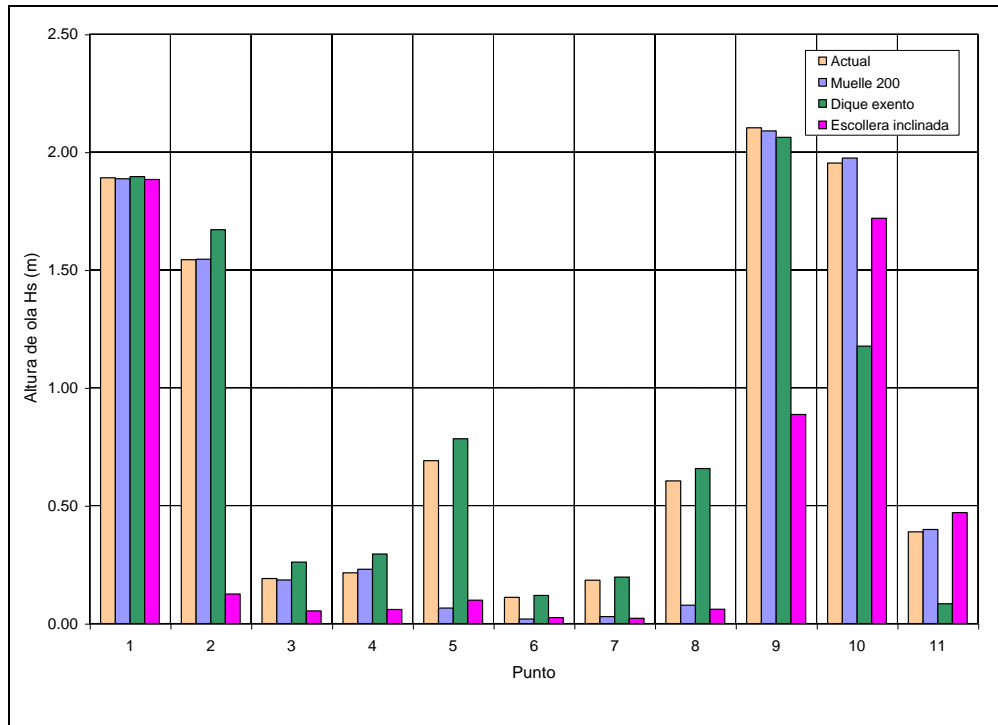


Figura 6.5. Comparación de resultados para el Escenario 2

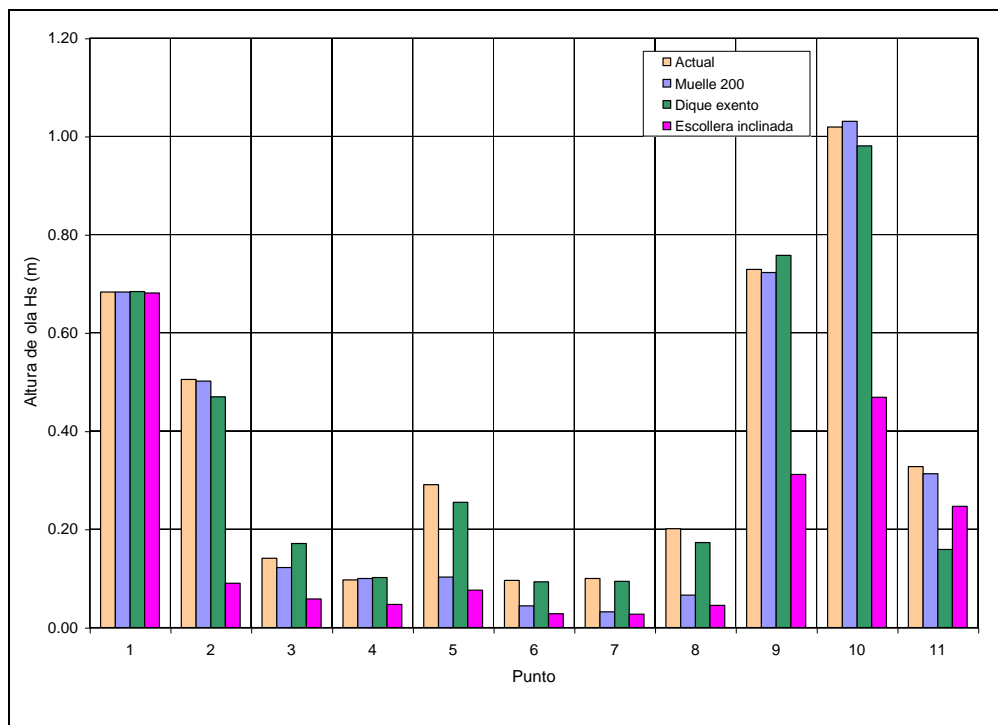


Figura 6.6. Comparación de resultados para el Escenario 3

Tomando como base esta información se calcularon los porcentajes de reducción de Hs (respecto de la configuración actual) para cada una de las configuraciones alternativas en los 11 puntos de control del área modelada. La **Tabla 6.3** muestra el resultado correspondiente para los tres escenarios de cálculo analizados. Los valores negativos presentes en esta tabla indican situaciones en las que la agitación aumenta respecto de la condición actual.

Además del porcentaje de reducción en cada punto, en la **Tabla 6.3** se señalan el porcentaje total que se obtiene promediando el resultado de los 11 valores obtenidos para cada simulación y el porcentaje de reducción correspondiente al promedio de los puntos interiores del puerto (4 a 8), los cuales incluyen las ubicaciones sobre muelle de ultramar y dentro de dársena de servicio.

Tabla 6.3. Porcentajes de atenuación del oleaje para los escenarios analizados

Punto	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	Muelle200	Exento	Inclinada	Muelle200	Exento	Inclinada	Muelle200	Exento	Inclinada
1	0.0	0.5	-0.5	0.2	-0.3	0.4	0.0	-0.1	0.3
2	-1.3	1.3	77.3	-0.1	-8.3	91.9	0.6	6.9	82.2
3	5.3	-26.3	36.8	3.1	-36.6	71.7	13.5	-21.3	58.9
4	11.1	-16.7	27.8	-7.0	-37.2	72.1	-3.1	-5.2	51.5
5	67.6	2.9	64.7	90.4	-13.5	85.7	64.6	12.4	73.9
6	57.1	14.3	42.9	82.9	-7.2	77.5	54.2	3.1	70.8
7	61.1	11.1	44.4	84.2	-7.1	88.0	68.0	6.0	73.0
8	66.7	0.0	58.3	87.1	-8.8	89.9	67.2	13.9	77.6
9	-2.7	2.7	46.7	0.6	1.9	57.8	0.8	-4.0	57.2
10	-0.7	-2.1	56.4	-1.1	39.8	12.0	-1.2	3.7	54.0
11	2.4	-19.0	35.7	-2.6	78.4	-21.1	4.6	51.5	24.7
Total	24.2	-2.9	44.6	30.7	0.1	56.9	24.5	6.1	56.7
Total int.	52.7	2.3	47.6	67.5	-14.7	82.6	50.2	6.1	69.4

Esta primera etapa de evaluación, a través de los resultados presentados, mostró que la prolongación de la escollera actual aparece como la solución más eficiente para la atenuación de la agitación, en comparación con las otras dos tipologías evaluadas.

La alternativa de prolongar el Muelle Norte con vistas a aumentar la protección en la Dársena de Servicio resulta eficiente para los puntos interiores (4 a 8), pero presenta la desventaja de restringir demasiado el área de acceso a los muelles, pudiendo afectar el área de maniobras de las embarcaciones. Por otra parte, esta alternativa introduce el efecto no deseado de

incrementar la agitación en el área externa de la dársena (puntos 9 y 10) debido a la condición altamente reflejante del muro.

La opción de construir un dique exento que pudiera dar abrigo a la zona de interés para el puerto parece poco eficiente a la luz de los resultados obtenidos en esta evaluación. En efecto, en los casos analizados esta alternativa mostró importantes aumentos en los niveles de agitación para algunas ubicaciones puntuales.

La prolongación de la escollera actual se muestra como la alternativa que pudiera brindar resultados más eficientes para la reducción de la agitación, tanto para el sector interno del puerto como para la zona exterior, la cual podría ser utilizada como zona de fondeadero de embarcaciones o promover en el futuro la construcción de un nuevo muelle. Cabe señalar que la orientación de una posible prolongación de la escollera podría afectar la zona de acceso al puerto complicando maniobrabilidad de las embarcaciones, por lo cual, la orientación de la misma es un aspecto importante a tener en cuenta en este estudio.

Como conclusión primaria de esta primera etapa de evaluación surgió la conveniencia de profundizar el análisis sobre configuraciones alternativas que contemplaran la prolongación de la escollera actual, estudiando los efectos que la orientación y longitud de la misma pudieran generar sobre la agitación inducida por acción del oleaje incidente.

6.2 Etapa 2

Con la misma metodología de análisis desarrollada en la primera etapa para la evaluación de alternativas, y a la luz de las conclusiones que surgen de los resultados obtenidos en la misma, para esta segunda etapa se decidió analizar la eficiencia de dos soluciones consistentes en la prolongación de la escollera actual, con dos longitudes diferentes, y manteniendo la orientación original en ambos casos. Una tercera alternativa analizada en este contexto consistió en una solución combinada, conformada por una extensión del Muro Norte y una prolongación de la escollera actual.

El resumen de las configuraciones analizadas en esta etapa es el siguiente:

- *Prolongación de la escollera actual en una longitud de $L=$ de 150 m.*
- *Prolongación de la escollera actual en una longitud de $L=$ de 300 m.*
- *Solución Combinada: prolongación de escollera de $L=150$ m conjuntamente con prolongación de $L=100$ m para el muelle pesquero.*

Las configuraciones propuestas para esta etapa de evaluación son presentadas en las **Figuras 6.7 a 6.9**, donde se muestran las tres grillas de cálculo correspondientes, las cuales fueron construidas de igual forma que para el caso de la configuraciones anteriores y presentan idénticas características para la modelación.

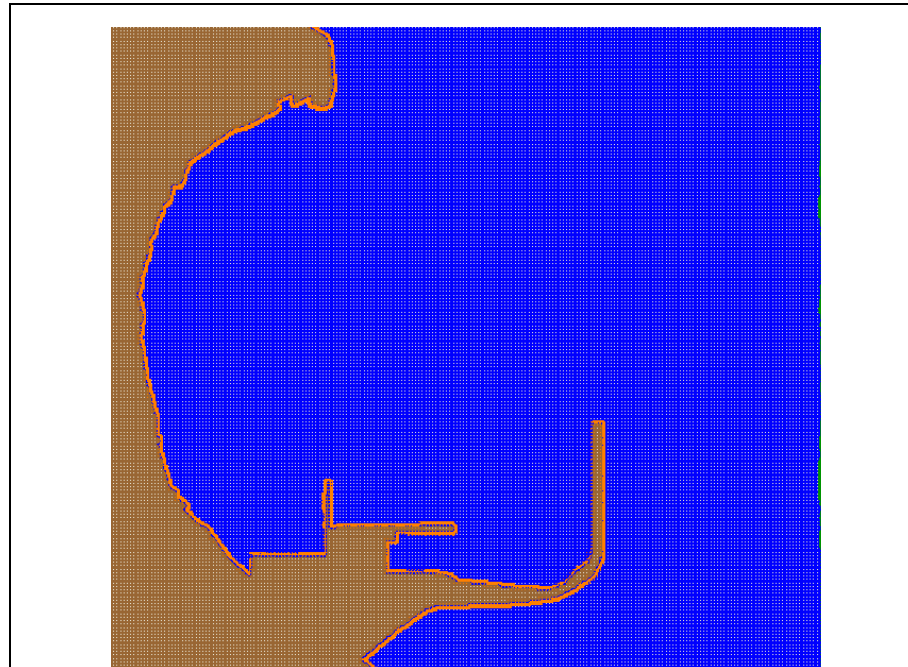


Figura 6.7. Alternativa 1 – Escollera prolongada en L=150

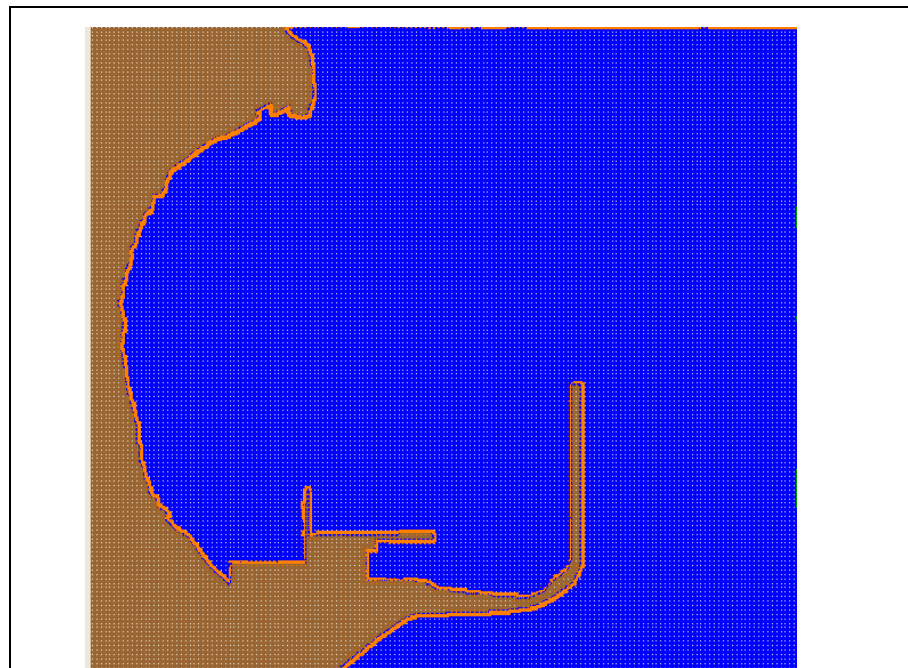


Figura 6.8. Alternativa 2–Escollera prolongada en L=300m

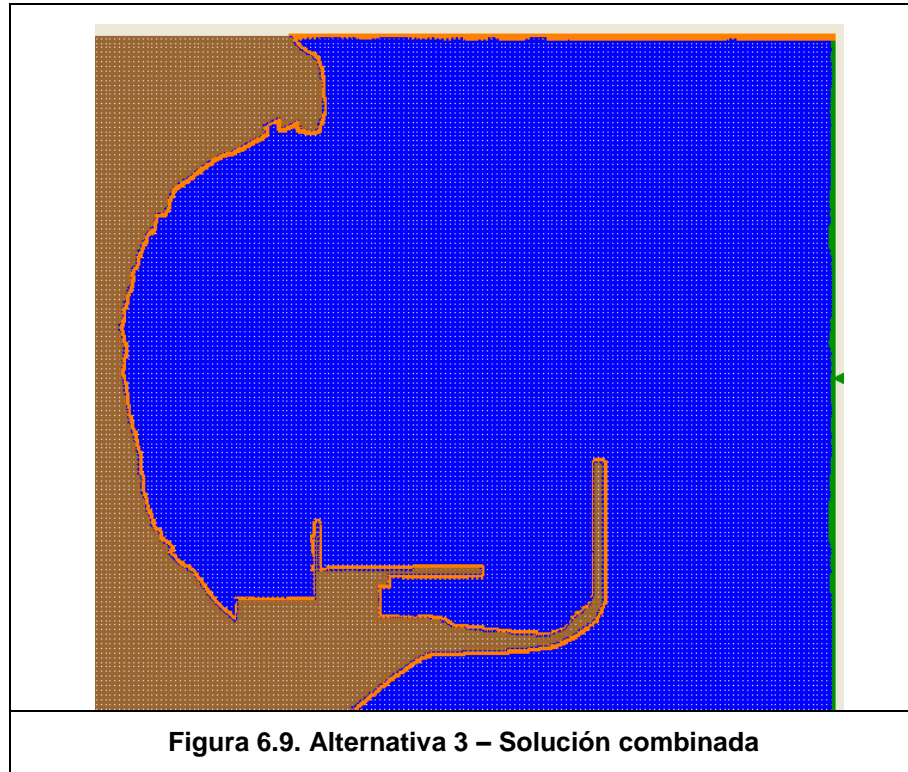


Figura 6.9. Alternativa 3 – Solución combinada

Para la realización de estos ensayos numéricos se repitieron las mismas condiciones de simulación utilizadas para la configuración actual y para las configuraciones de la primera etapa de evaluación; considerándose las mismas propiedades reflejantes para los contornos (coeficientes de amortiguamiento), los mismos escenarios de cálculo (**Tabla 6.4**), y adoptando los mismos puntos de control para la evaluación de los resultados.

Coefficientes de amortiguamiento para los contornos:

- Zona de playa: $\alpha=0.8$ (altamente absorbente)
- Escollera y dique exento (enrocado) $\alpha=0.5$ (parcialmente reflejante)
- Sector de muelles $\alpha=0. \square 1$ (altamente reflejante)

Tabla 6.4. Escenarios de cálculo

Escenario	Hs (m)	Tp (s)	Dirección	Casos observados
1. Swell E	2.0	12	90°	17 casos en 10 años
2. Viento ENE	2.0	6	60°	21 casos en 10 años
3. Swell ENE	0.70	15	67.5°	12 casos en 10 años

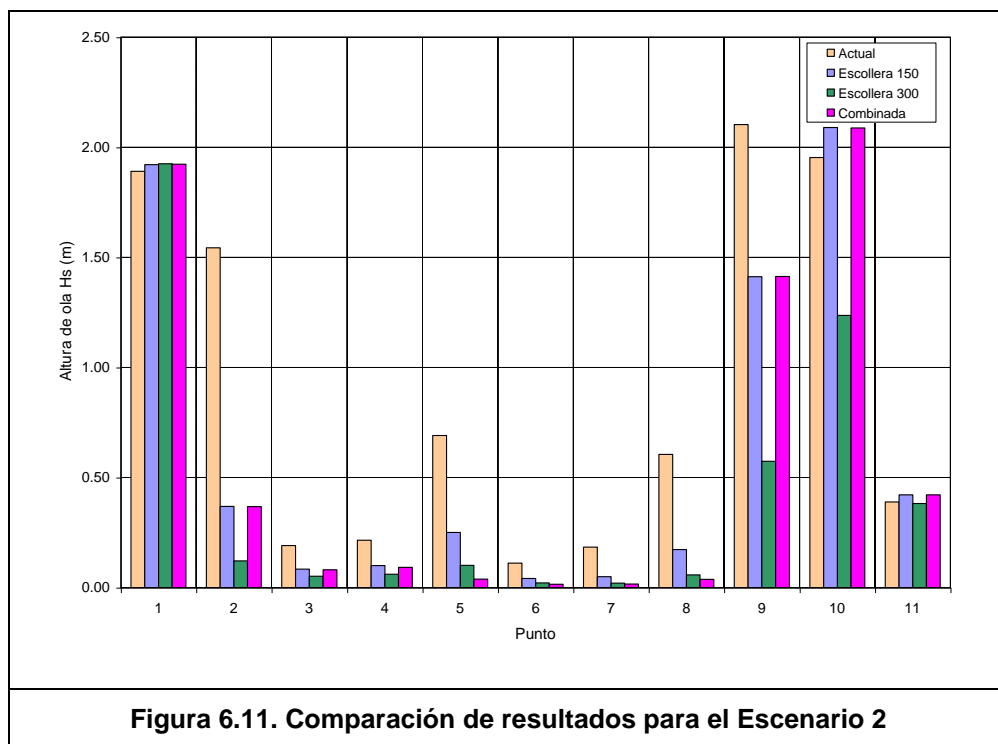
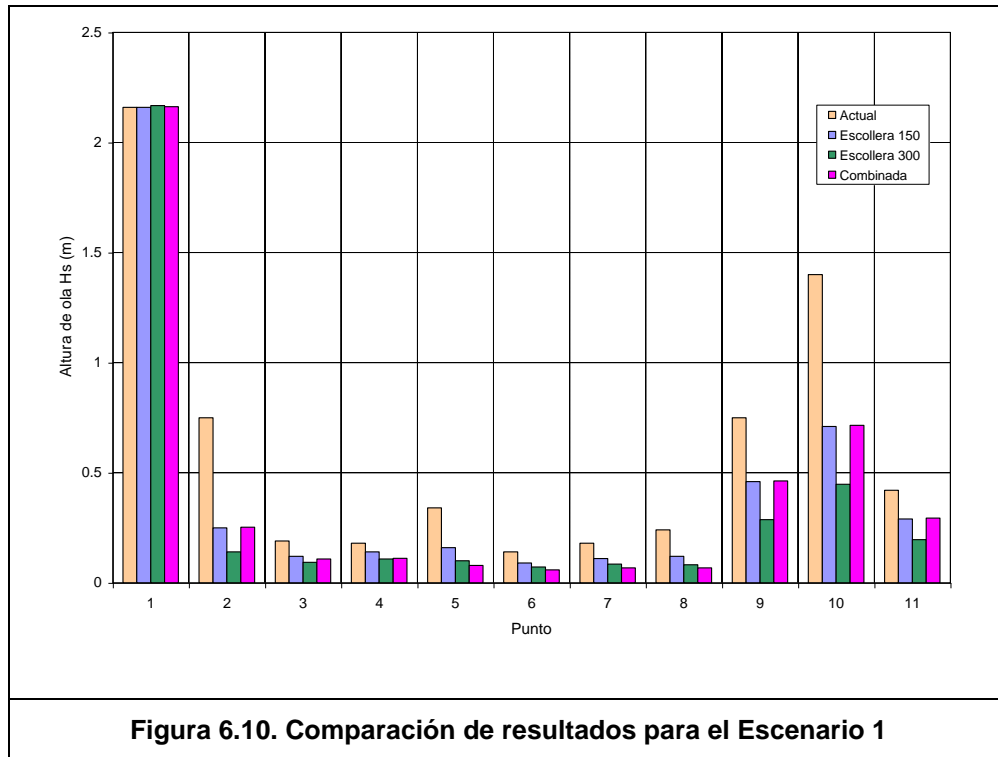
Bajo estas condiciones, se obtuvieron los resultados presentados en la **Tabla 6.5**, donde se observan los valores de Hs (m) correspondientes a los puntos de control seleccionados para cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla 6.5. Valores de Hs (m) en cada punto para los tres escenarios analizados

Punto	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	Esco 150	Esco 300	Combi	Esco 150	Esco 300	Combi	Esco 150	Esco 300	Combi
1	2.16	2.17	2.16	1.92	1.93	1.92	0.68	0.68	0.68
2	0.25	0.14	0.25	0.37	0.12	0.37	0.15	0.08	0.15
3	0.12	0.09	0.11	0.08	0.05	0.08	0.07	0.05	0.07
4	0.14	0.11	0.11	0.10	0.06	0.09	0.06	0.04	0.05
5	0.16	0.10	0.08	0.25	0.10	0.04	0.12	0.07	0.06
6	0.09	0.07	0.06	0.04	0.02	0.02	0.04	0.03	0.03
7	0.11	0.09	0.07	0.05	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02
8	0.12	0.08	0.07	0.17	0.06	0.04	0.07	0.04	0.04
9	0.46	0.29	0.46	1.41	0.57	1.41	0.40	0.23	0.40
10	0.71	0.45	0.72	2.09	1.24	2.09	0.61	0.33	0.61
11	0.29	0.20	0.29	0.42	0.38	0.42	0.28	0.20	0.28

Las **Figuras A-IV.4 a A-IV.6**, ubicadas en el **ANEXO IV**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada en las tres configuraciones para el caso del **Escenario 2**.

Por otra parte, en las **Figuras 6.10 a 6.12**, los gráficos de barras construidos con los valores de Hs (m) correspondientes a los puntos de control seleccionados permiten comparar los resultados obtenidos para la configuración actual y para las alternativas propuestas. De este modo se puede tener una primera apreciación de la atenuación en la agitación para las diferentes configuraciones estudiadas.



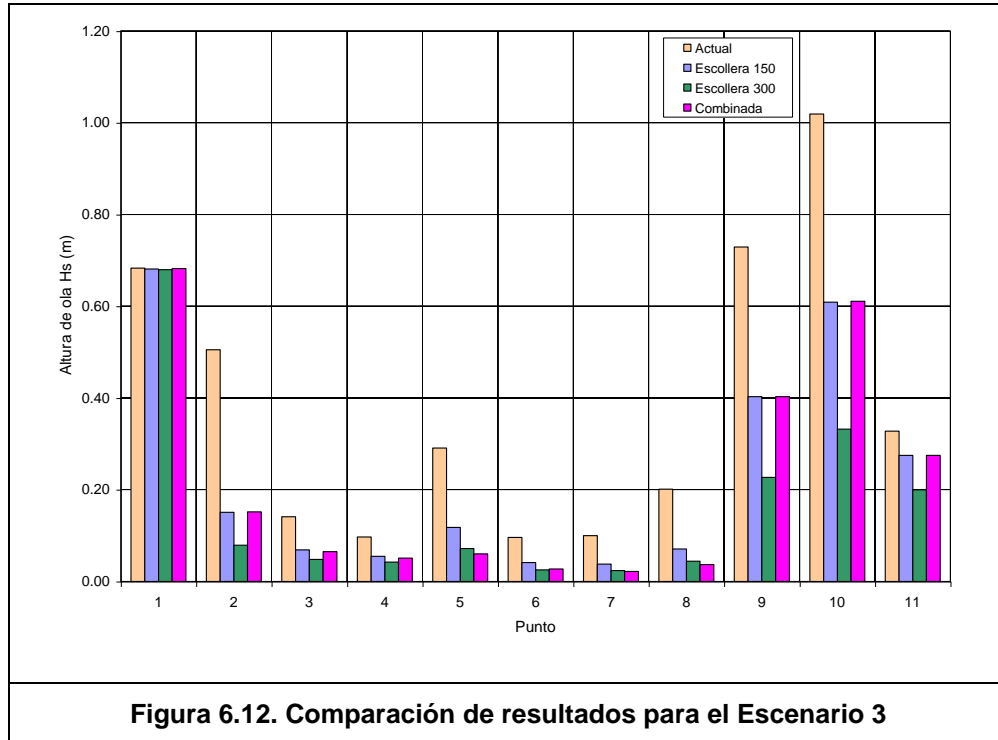


Figura 6.12. Comparación de resultados para el Escenario 3

Tomando como base esta información se calcularon los porcentajes de reducción de Hs (respecto de la configuración actual) para cada una de las configuraciones alternativas en los 11 puntos de control del área modelada. La **Tabla 6.6** muestra el resultado correspondiente para los tres escenarios de cálculo analizados. Los valores negativos presentes en esta tabla indican situaciones en las que la agitación aumenta respecto de la condición actual.

Además del porcentaje de reducción en cada punto, en la **Tabla 6.6** se señalan el porcentaje total que se obtiene promediando el resultado de los 11 valores obtenidos para cada simulación y el porcentaje de reducción correspondiente al promedio de los puntos interiores del puerto (4 a 8), los cuales incluyen las ubicaciones sobre muelle de ultramar y dentro de dársena de servicio.

Tabla 6.6. Porcentaje de atenuación del oleaje para los escenarios analizados

Punto	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	Esco 150	Esco 300	Combi	Esco 150	Esco 300	Combi	Esco 150	Esco 300	Combi
1	0.0	-0.4	-0.1	-1.6	-1.8	-1.7	0.3	0.4	0.1
2	66.7	81.3	66.3	76.1	92.2	76.2	70.1	84.4	69.9
3	36.8	51.1	43.2	56.0	72.8	57.6	51.1	66.0	53.9
4	22.2	40.0	38.3	53.5	71.6	57.2	43.3	56.7	47.4
5	52.9	70.6	76.8	63.7	85.4	94.5	59.5	75.3	79.4
6	35.7	48.6	57.9	63.1	81.1	86.5	57.3	74.0	71.9
7	38.9	52.8	62.2	72.8	89.1	91.3	62.0	76.0	78.0
8	50.0	65.8	71.7	71.4	90.4	93.9	64.7	78.1	81.6
9	38.7	61.7	38.3	32.9	72.7	32.8	44.7	68.9	44.7
10	49.3	68.1	48.9	-7.0	36.7	-6.9	40.2	67.4	40.0
11	31.0	53.3	30.0	-8.2	1.8	-8.2	16.2	39.0	16.2
Total	38.4	53.9	48.5	43.0	62.9	52.1	46.3	62.4	53.0
Total int.	40.0	55.6	61.4	64.9	83.5	84.7	57.3	72.0	71.7

Evaluando los efectos de la longitud de la prolongación de la escollera pudo observarse que al pasar de los L=150 m a los L=300 m se obtiene una reducción adicional en la agitación del orden del 18 %.

Por otro lado, si se comparan estos resultados con los obtenidos para la prolongación inclinada de L=200, analizada en la Etapa 1, se observa que la alternativa inclinada genera una atenuación mayor que la recta de L=150 m del orden del 10% y menor que la prolongación recta de L=300 m en un orden del 8 %. Consecuentemente, la opción de construir una prolongación inclinada parece poco ventajosa, más aún si se tienen en cuenta las dificultades constructivas que pudiera demandar este tipo de solución, y las complicaciones que pudiera generar para el acceso de las embarcaciones al puerto.

La solución combinada, con la prolongación del Muelle Norte en L=100 m y la escollera actual en L=150 m, resultó ser la más eficiente para reducir la agitación en los puntos interiores del puerto, presentando menor eficacia en la zona exterior a la Dársena de Servicio.

En términos generales, la alternativa de prolongación de la escollera en L=300 m resultó hasta aquí la opción más conveniente desde el punto de vista funcional de todas las configuraciones analizadas. Considerando solamente los puntos interiores, los resultados son altamente satisfactorios y levemente inferiores a los de la solución combinada; considerando la totalidad

de los puntos y el área de abrigo generada presenta claras ventajas con respecto al resto de las alternativas evaluadas.

6.3 Etapa 3

En esta última etapa de evaluación se estudiaron dos alternativas que incorporan modificaciones mínimas a las configuraciones que en la etapa anterior mostraran los mejores resultados.

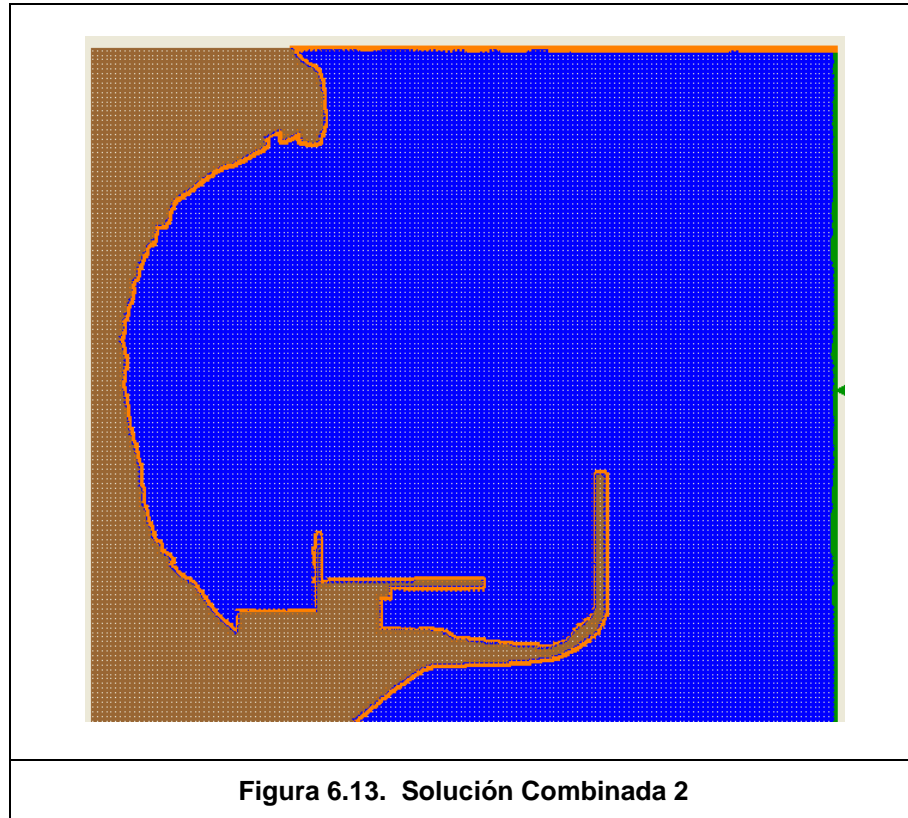
Por un lado, se evalúa una segunda solución combinada para la cual se considera una prolongación de la escollera actual de $L=200$ m, en lugar de los $L=150$ m de la solución analizada en la etapa anterior.

Por otra parte, se estudia la prolongación recta de la escollera en una longitud de $L=400$ m, de acuerdo con el requerimiento de la DGIP ante la posibilidad de establecer sobre la misma un muelle destinado al atraque de cruceros.

En resumen, en esta etapa se evaluaron las siguientes configuraciones:

- *Solución Combinada 2: prolongación de escollera de $L=200$ m conjuntamente con prolongación de $L=100$ m para el muelle pesquero*
- *Escollera 400: prolongación de la escollera actual en una longitud de $L= 400$ m.*

Las configuraciones propuestas para esta etapa de evaluación son presentadas en las **Figuras 6.13 y 6.14**, donde se muestran las tres grillas de cálculo correspondientes, las cuales fueron construidas de igual forma que para el caso de la configuraciones anteriores y presentan idénticas características para la modelación.





Para la realización de estos ensayos numéricos se repitieron las mismas condiciones de simulación utilizadas en todos los casos anteriores; considerándose las mismas propiedades reflejantes para los contornos (coeficientes de amortiguamiento), los mismos escenarios de cálculo (**Tabla 6.7**), y adoptando los mismos puntos de control para la evaluación de los resultados.

Coefficientes de amortiguamiento para los contornos:

- *Zona de playa:* $\alpha=0.8$ (altamente absorbente)
- *Escollera y dique exento (enrocado)* $\alpha=0.5$ (parcialmente reflejante)
- *Sector de muelles* $\alpha=0.1$ (altamente reflejante)

Tabla 6.7. Escenarios de cálculo

Escenario	Hs (m)	Tp (s)	Dirección	Casos observados
1. Swell E	2.0	12	90°	17 casos en 10 años
2. Viento ENE	2.0	6	60°	21 casos en 10 años
3. Swell ENE	0.70	15	67.5°	12 casos en 10 años

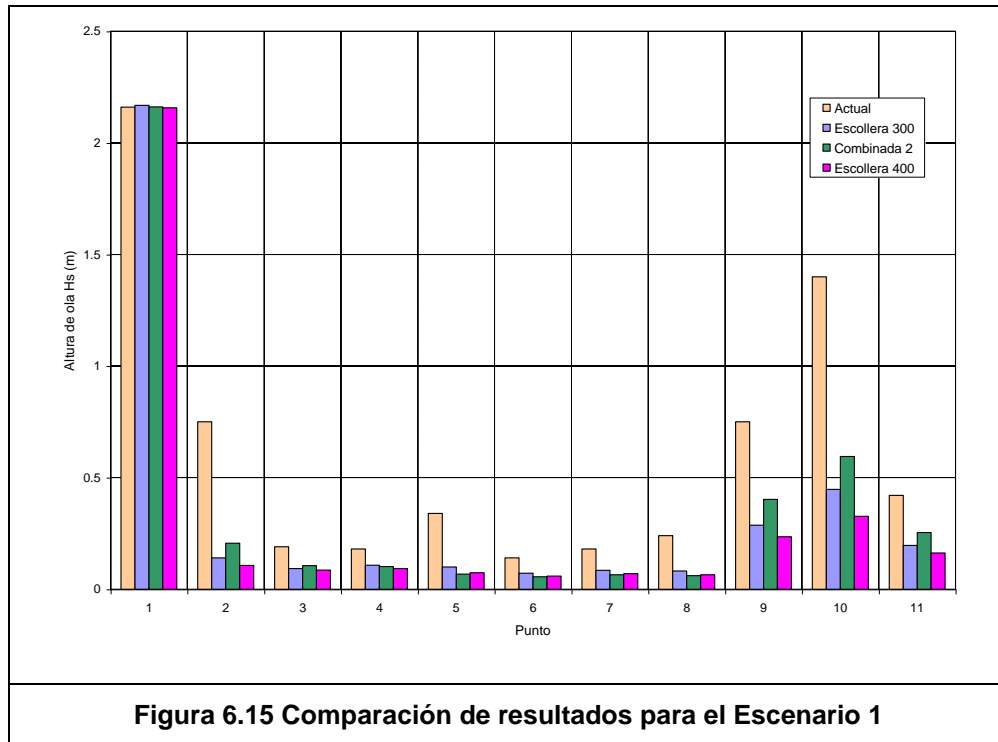
Bajo estas condiciones, se obtuvieron los resultados presentados en la **Tabla 6.8**, donde se observan los valores de Hs (s) correspondientes a los puntos de control seleccionados para cada una de las simulaciones realizadas.

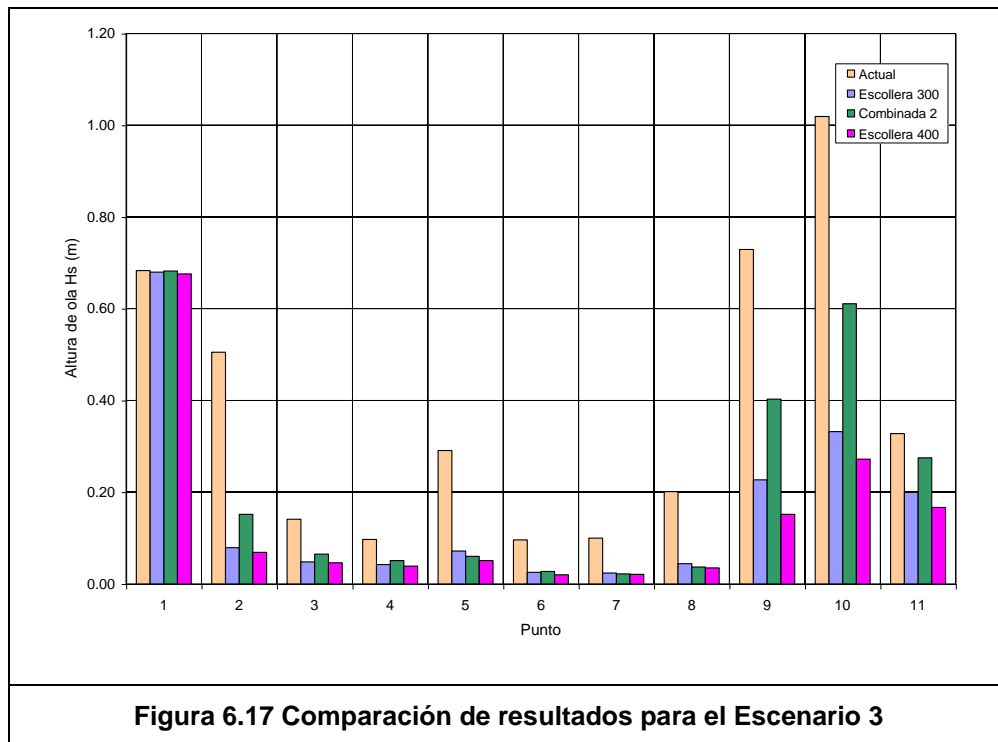
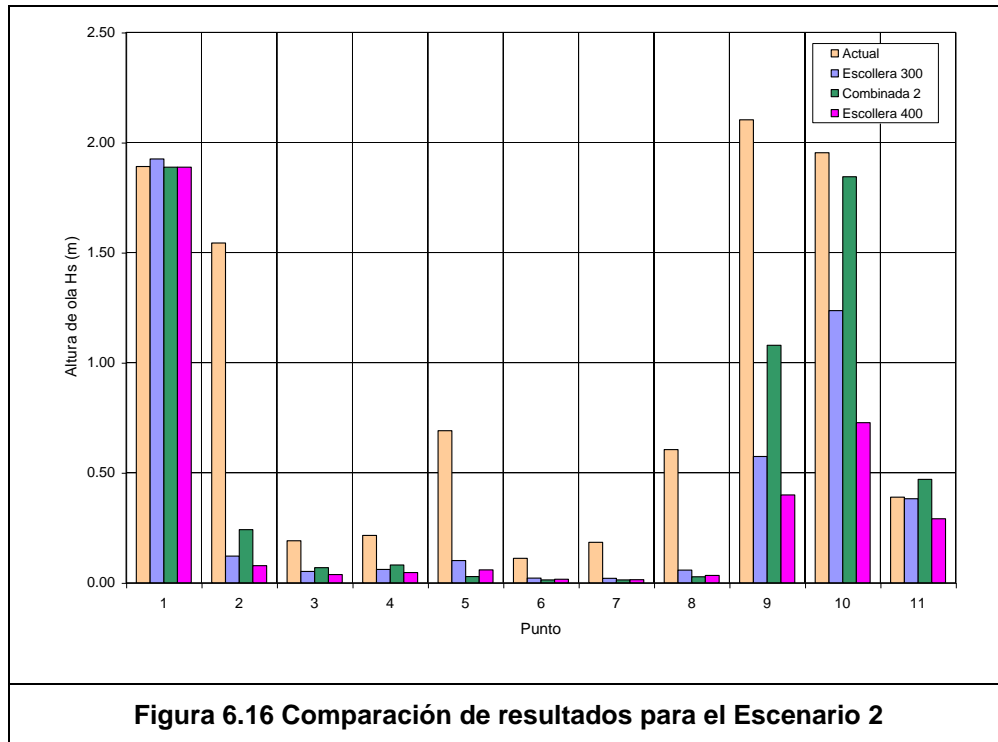
Tabla 6.8. Valores de Hs (m) para los escenarios analizados

Punto	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	Esco 300	Combi 2	Esco 400	Esco 300	Combi 2	Esco 400	Esco 300	Combi 2	Esco 400
1	2.17	2.16	2.16	1.93	1.89	1.89	0.68	0.68	0.68
2	0.14	0.21	0.11	0.12	0.24	0.08	0.08	0.12	0.07
3	0.09	0.11	0.09	0.05	0.07	0.04	0.05	0.07	0.05
4	0.11	0.10	0.09	0.06	0.08	0.05	0.04	0.05	0.04
5	0.10	0.07	0.07	0.10	0.03	0.06	0.07	0.05	0.05
6	0.07	0.06	0.06	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02
7	0.09	0.07	0.07	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
8	0.08	0.06	0.07	0.06	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
9	0.29	0.40	0.24	0.57	1.08	0.40	0.23	0.34	0.15
10	0.45	0.60	0.33	1.24	1.84	0.73	0.33	0.50	0.27
11	0.20	0.25	0.16	0.38	0.47	0.29	0.20	0.25	0.17

Las **Figuras A-IV.7 a A-IV.9**, ubicadas en el **ANEXO IV**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada en las tres configuraciones para el caso del **Escenario 2**.

Por otra parte, en las **Figuras 6.15 a 6.17**, los gráficos de barras construidos con los valores de Hs (m) correspondientes a los puntos de control seleccionados permiten comparar los resultados obtenidos para la configuración actual y para las alternativas propuestas. De este modo se puede tener una primera apreciación de la atenuación en la agitación para las diferentes configuraciones estudiadas.





Tomando como base esta información se calcularon los porcentajes de reducción de Hs (respecto de la configuración actual) para cada una de las configuraciones alternativas en los 11 puntos de control del área modelada. La **Tabla 6.9** muestra el resultado correspondiente para los tres escenarios de cálculo analizados. Los valores negativos presentes en esta tabla indican situaciones en las que la agitación aumenta respecto de la condición actual.

Además del porcentaje de reducción en cada punto, en la **Tabla 6.9** se señalan el porcentaje total que se obtiene promediando el resultado de los 11 valores obtenidos para cada simulación y el porcentaje de reducción correspondiente al promedio de los puntos interiores del puerto (4 a 8), los cuales incluyen las ubicaciones sobre muelle de ultramar y dentro de dársena de servicio.

Tabla 6.9. Porcentaje de atenuación del oleaje para los escenarios analizados

Punto	Escenario 1			Escenario 2			Escenario 3		
	Esco 300	Combi 2	Esco 400	Esco 300	Combi 2	Esco 400	Esco 300	Combi 2	Esco 400
1	-0.4	0.0	0.1	-1.8	0.2	0.2	0.4	0.1	1.0
2	81.3	72.5	85.7	92.2	84.4	94.9	84.4	75.8	86.3
3	51.1	44.2	54.7	72.8	63.9	80.6	66.0	53.9	67.4
4	40.0	43.3	48.3	71.6	62.3	78.6	56.7	52.6	59.8
5	70.6	80.0	78.2	85.4	95.9	91.5	75.3	83.2	82.5
6	48.6	60.0	57.9	81.1	88.3	85.6	74.0	76.0	79.2
7	52.8	63.9	61.1	89.1	92.9	92.4	76.0	80.0	79.0
8	65.8	74.6	72.9	90.4	95.5	94.5	78.1	84.1	82.6
9	61.7	46.3	68.7	72.7	48.7	81.0	68.9	52.8	79.1
10	68.1	57.5	76.6	36.7	5.6	62.8	67.4	50.8	73.3
11	53.3	39.5	61.4	1.8	-20.8	25.2	39.0	23.2	49.1
Total	53.9	52.9	60.5	62.9	56.1	71.6	62.4	57.5	67.2
Total int.	55.6	64.4	63.7	83.5	87.0	88.5	72.0	75.2	76.6

Observando los resultados obtenidos para la Solución Combinada 2, y comparándolos con los correspondientes a la Solución Combinada de la etapa anterior, puede verse que los niveles de agitación se reducen en un orden de 3%, considerando solo puntos interiores, y 4.5% considerando la totalidad de los puntos.

Por otra parte, el incremento en la longitud de la prolongación de la escollera, pasando de L=300 m a L=400 m, significó una reducción de la agitación del orden del 7% considerando la totalidad de los puntos.

Finalmente, cabe destacar que la alternativa de prolongar la escollera en $L=400$ m ha mostrado ser la solución más eficaz en esta evaluación, tanto si se consideran los puntos interiores de la Dársena de Servicio, como si se considera la totalidad de los mismos.

7 ANALISIS EN DETALLE DE LA CONFIGURACION SELECCIONADA

Acorde al resultado de la evaluación de las distintas alternativas de configuración para la planta portuaria, habiéndose desarrollado un análisis preliminar de la eficiencia de las mismas para la atenuación del oleaje, la DGIP decidió avanzar con el estudio más detallado de la opción seleccionada.

Teniendo en cuenta no solo el análisis del comportamiento hidráulico de la solución, sino además otros factores vinculados a aspectos constructivos, valoración económica de las obras, y posibilidades futuras de desarrollo para el puerto; la DGIP seleccionó la alternativa de prolongación recta de la escollera en $L=400$ m como la más conveniente para el proyecto.

Consecuentemente, siguiendo el propósito de profundizar la evaluación para el comportamiento hidráulico de esta alternativa se ejecutaron un conjunto de simulaciones numéricas destinadas a analizar la agitación generada en la misma considerando diferentes situaciones, como ser: escenarios frecuentes de oleaje, escenarios extremos de oleaje, influencia de la variación del nivel del mar, y sensibilidad a las propiedades reflejantes de las estructuras.

Para esta nueva etapa del estudio se vuelve a utilizar la misma grilla de cálculo implementada en la etapa anterior, considerando además las mismas condiciones absorbentes para los contornos. En este caso, se han agregado algunos puntos de control adicionales a los ya utilizados con anterioridad, tal como puede apreciarse en la **Figura 7.1**.

7.1 Escenarios de cálculo analizados

Del análisis detallado del clima de olas en la región costera de Comodoro Rivadavia (Parte I) se han seleccionado un conjunto de situaciones de interés para el análisis que representan estadísticamente tanto condiciones frecuentes como condiciones extremas del oleaje.

Teniendo en cuenta las direcciones más importantes en la incidencia del oleaje sobre la costa, se seleccionaron los casos considerados de mayor interés, dada su combinación de intensidad con frecuencia de ocurrencia, tanto para olas locales como para olas oceánicas, en las tres

direcciones principales. De esta manera, se escogieron para el análisis los escenarios frecuentes presentados en la **Tabla 7.1**.

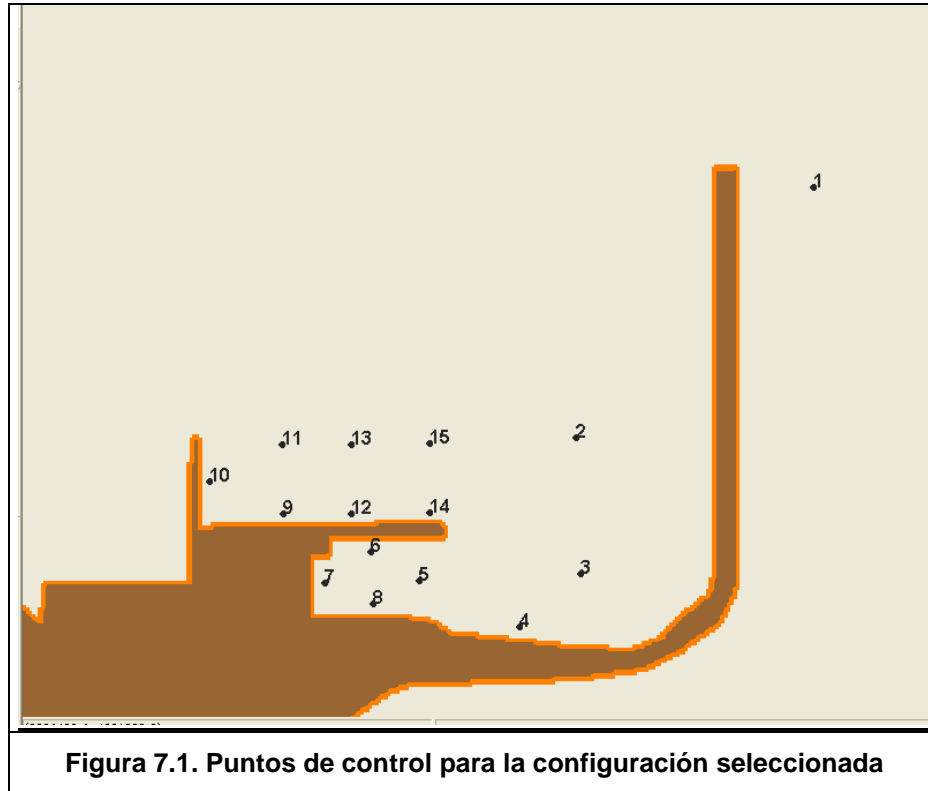


Tabla 7.1. Escenarios frecuentes

Escenario		Hs (m)	Tp (s)	Dirección	Nº casos de ocurrencia
ENE	Viento	1.25	5.0	67.5°	201 (p=0.988)
	Swell	0.7	15.0	67.5°	21 (p=0.999)
ESTE	Viento	1.75	6.0	90°	215 (p=0.954)
	Swell	1.25	12.0	90°	11 (p=0.988)
ESE	Viento	2.25	9.0	112.5°	32 (p=0.904)
	Swell	1.75	14.0	112.5°	73 (p=0.997)

Para las mismas direcciones de incidencia se definieron los escenarios extremos, considerando, tanto para oleaje local como para oleaje oceánico, las alturas de ola correspondiente a un período de retorno de 50 años, tal como se indica en la **Tabla 7.2**.

Tabla 7.2. Escenarios extremos

Escenario		Hs (m)	Tp (s)	Dirección	TR (años)
ENE	Viento	2.16	7.5	67.5°	50
	Swell	0.76	15.0	67.5°	50
ESTE	Viento	3.27	10.0	90°	50
	Swell	2.00	15.0	90°	50
ESE	Viento	4.21	12.0	112.5°	50
	Swell	2.66	17.5	112.5°	50

Cada uno de estos escenarios fue motivo de una simulación. Para el caso de las condiciones frecuentes se utilizó un nivel medio del mar, definido como N=2.6 m (MOP); mientras que para los escenarios extremos se utilizó un nivel de pleamar de N=6.54 m (MOP).

7.2 Resultados

Los resultados correspondientes a las 12 simulaciones realizadas son presentados en forma gráfica en las **Figuras A-V.1 a A-V.6** (escenarios frecuentes) y **Figuras A-V.7 a A-V.12** (escenarios extremos) del **ANEXO V** de este informe. Dichas figuras permiten apreciar la distribución de alturas del oleaje para la totalidad del área modelada. Por otra parte, las **Tablas 7.3 y 7.4** muestran los valores puntuales de Hs (m) para cada uno de los puntos de control seleccionados.

Tabla 7.3. Resultados para escenarios frecuentes – Valores puntuales de Hs(m)

Ubicación	Escenarios de Viento			Escenarios de Swell		
	ENE	E	ESE	ENE	E	ESE
1	1.06	1.70	2.83	0.68	1.35	2.19
2	0.02	0.03	0.06	0.07	0.07	0.09
3	0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	0.06
4	0.01	0.02	0.06	0.04	0.05	0.07
5	0.02	0.02	0.04	0.05	0.04	0.06
6	0.00	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04
7	0.00	0.01	0.04	0.02	0.03	0.05
8	0.01	0.01	0.04	0.04	0.03	0.05
9	0.08	0.09	0.14	0.15	0.14	0.14
10	0.10	0.10	0.17	0.26	0.17	0.18
11	0.13	0.10	0.16	0.20	0.19	0.18
12	0.06	0.07	0.10	0.11	0.11	0.13
13	0.09	0.09	0.14	0.16	0.16	0.15
14	0.04	0.04	0.08	0.11	0.09	0.11
15	0.06	0.06	0.10	0.13	0.12	0.13

Tabla 7.4. Resultados para escenarios extremos – Valores puntuales de Hs(m)

Ubicación	Escenarios de Viento			Escenarios de Swell		
	ENE	E	ESE	ENE	E	ESE
1	1.97	3.23	4.93	0.76	2.22	3.20
2	0.11	0.14	0.18	0.07	0.12	0.14
3	0.06	0.11	0.13	0.04	0.09	0.10
4	0.07	0.09	0.14	0.03	0.08	0.12
5	0.09	0.10	0.14	0.06	0.11	0.10
6	0.03	0.07	0.10	0.03	0.06	0.09
7	0.03	0.07	0.11	0.02	0.06	0.10
8	0.04	0.07	0.11	0.04	0.07	0.11
9	0.33	0.29	0.34	0.15	0.25	0.29
10	0.38	0.35	0.46	0.33	0.46	0.41
11	0.43	0.40	0.36	0.24	0.37	0.32
12	0.23	0.23	0.28	0.13	0.23	0.25
13	0.39	0.34	0.35	0.18	0.30	0.29
14	0.14	0.19	0.23	0.10	0.20	0.24
15	0.25	0.26	0.28	0.12	0.20	0.24

En estas tablas se ha indicado el valor más alto de agitación obtenido en cada punto para el conjunto de escenarios analizados. Como puede verse, si bien estos valores, en general, se mantienen muy por debajo de los límites de admisibilidad ($H_s=0.40$ m) recomendados por la norma ROM para el tipo de embarcación que opera en el puerto, los valores más altos de agitación en escenarios frecuentes se encuentran asociados a las olas oceánicas, mientras que por el contrario, para los escenarios extremos la agitación más elevada se encuentra asociada a eventos de oleaje local.

En el primer caso, para el oleaje oceánico los valores de H_s más altos se distribuyen entre las direcciones ENE y ESE, mientras que para el oleaje local el escenario más desfavorable es predomina claramente la dirección ESE. Sin embargo, cabe resaltar que los resultados son muy próximos entre sí para las tres direcciones y lo que se destaca claramente es elevado nivel de atenuación del oleaje para todos los casos analizados.

Con los niveles de agitación evidenciados por estos resultados, la nueva configuración portuaria podrá brindar condiciones muy favorables para la operación de las embarcaciones en situaciones frecuentes, como así también mantener condiciones de seguridad apropiadas frente a la ocurrencia de temporales intensos.

7.3 Reducción de la agitación respecto de la configuración actual

Otro aspecto que interesa analizar en este informe es el de la reducción efectiva de los niveles agitación inducida por el oleaje, respecto de la condición actual, para la configuración portuaria seleccionada y evaluada en esta sección.

Siguiendo dicho propósito, se seleccionaron cuatro escenarios frecuentes para los cuales en las condiciones actuales el oleaje tiene posibilidades de generar condiciones de agitación relativamente importantes para el entorno del puerto. Consecuentemente, se realizaron cuatro simulaciones numéricas para la configuración actual en las que se analizaron los escenarios Viento ENE, Viento E, Swell ENE y Swell E, presentados en la **Tabla 7.1**.

El resultado de estas simulaciones se encuentra en la **Tabla 7.5**, donde se presentan; por un lado, los valores puntuales de H_s (m) correspondientes a las situaciones mencionadas, y por otro lado, los porcentajes de reducción de agitación obtenidos en cada punto al comparar los valores puntuales de H_s entre la condición actual y la configuración con la escollera prolongada en $L=400$ m.

Tabla 7.5. Resultado de la modelación de escenarios frecuentes para la configuración actual

Ubicación	Valores de Hs (m) para la configuración actual				Porcentajes de reducción de Hs para Escollera 400			
	Viento ENE	Viento E	Swell ENE	Swell E	Viento ENE	Viento E	Swell ENE	Swell E
1	1.06	1.73	0.68	1.41	-0.2	1.6	1.0	4.7
2	0.89	0.46	0.51	0.59	97.3	94.4	86.3	88.7
3	0.06	0.12	0.14	0.26	84.4	88.2	67.4	79.7
4	0.06	0.12	0.10	0.18	82.0	84.9	59.8	73.9
5	0.24	0.16	0.29	0.21	93.4	88.4	82.5	81.0
6	0.04	0.03	0.10	0.08	91.9	80.0	79.2	65.4
7	0.08	0.05	0.10	0.11	96.2	87.8	79.0	68.9
8	0.21	0.16	0.20	0.15	96.2	92.4	82.6	78.7
9	0.89	0.52	0.73	0.51	90.8	82.5	79.1	72.9
10	0.61	0.77	0.92	0.77	83.9	86.6	72.4	78.3
11	0.57	0.88	0.90	0.83	78.0	88.9	77.4	77.6
12	0.80	0.37	0.52	0.46	92.4	82.2	78.3	76.0
13	0.70	0.75	0.84	0.78	87.4	88.3	80.8	80.1
14	0.55	0.29	0.43	0.42	93.0	85.5	74.6	78.6
15	0.90	0.66	0.66	0.69	93.0	91.1	79.7	82.8
Reducción promedio (%) =					84.0	81.5	72.0	72.5

Este resultado señala un claro beneficio para el puerto desde el punto de vista de la atenuación del oleaje con la prolongación recta de la escollera en una longitud de $L=400$ m. Tal como se indica en la **Tabla 7.5**, la ganancia en la reducción de la agitación resulta del orden del 80 % para los escenarios frecuentes de olas de viento, y de un orden del 70 % para el oleaje oceánico frecuente.

7.4 Influencia de la marea

Dada la gran amplitud de la onda de marea astronómica que puede advertirse en toda la región patagónica, y particularmente la observada en el Puerto de Comodoro Rivadavia, resulta de especial interés estudiar la influencia que pudiese tener la variación del nivel del mar sobre la propagación del oleaje en la región costera.

Para ello, en esta sección se analizó la ocurrencia de cuatro escenarios de oleaje diferentes (tres escenarios frecuentes y uno extremo) para tres niveles de mar distintos, asociados a condiciones de bajamar, nivel medio, y pleamar extrema, respectivamente. Los niveles seleccionados para este análisis se encuentran referidos al plano de referencia MOP y fueron definidos de la siguiente manera:

- *Bajamar: $N=-0.27$ m. Corresponde al nivel de bajamar mínima predicho en la Tabla de Mareas del SHN para el año 2005.*

- Nivel medio: $N=2.6$ m. Corresponde al nivel medio predicho en la Tabla de Mareas del SHN para el año 2005.
- Pleamar: $N=6.54$ m. Corresponde a un nivel de pleamar astronómica máxima más la contemplación de una sobre elevación por efecto meteorológico y por calentamiento global.

Las Tablas 7.6 y 7.7 muestran una síntesis de las simulaciones realizadas junto con los resultados obtenidos en cada caso para la totalidad de los puntos de control

Tabla 7.6. Valores de Hs para distintos niveles del mar

Ubicación	Escenario Swell ENE $H=0.72$ $Tp=15$			Escenario Viento ENE $H=1.25$ $Tp=5$		
	$N=-0.27$	$N=2.40$	$N=6.54$	$N=-0.27$	$N=2.40$	$N=6.54$
1	0.69	0.68	0.72	1.12	1.06	0.89
2	0.06	0.07	0.06	0.02	0.02	0.02
3	0.04	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01
4	0.04	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01
5	0.05	0.05	0.06	0.02	0.02	0.01
6	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
7	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00
8	0.03	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01
9	0.21	0.15	0.14	0.07	0.08	0.07
10	0.21	0.26	0.31	0.03	0.10	0.10
11	0.25	0.20	0.23	0.15	0.13	0.11
12	0.14	0.11	0.12	0.06	0.06	0.05
13	0.20	0.16	0.17	0.11	0.09	0.08
14	0.09	0.11	0.10	0.04	0.04	0.03
15	0.14	0.13	0.11	0.07	0.06	0.05

Tabla 7.7. Valores de Hs para distintos niveles del mar

Ubicación	Escenario Viento E $H=1.75$ $Tp=6$			Escenario Swell E $H=2.00$ $Tp=15$		
	$N=-0.27$	$N=2.40$	$N=6.54$	$N=-0.27$	$N=2.40$	$N=6.54$
1	1.81	1.70	1.66	2.54	2.42	2.22
2	0.03	0.03	0.03	0.12	0.14	0.12
3	0.02	0.01	0.02	0.09	0.11	0.09
4	0.02	0.02	0.02	0.10	0.13	0.08
5	0.02	0.02	0.02	0.09	0.10	0.11
6	0.01	0.01	0.01	0.05	0.07	0.06
7	0.01	0.01	0.01	0.06	0.08	0.06
8	0.01	0.01	0.01	0.08	0.08	0.07
9	0.09	0.09	0.07	0.34	0.32	0.25
10	0.04	0.10	0.08	0.25	0.42	0.46
11	0.13	0.10	0.10	0.42	0.36	0.37
12	0.06	0.07	0.06	0.23	0.25	0.23
13	0.09	0.09	0.09	0.32	0.30	0.30
14	0.05	0.04	0.04	0.18	0.23	0.20
15	0.06	0.06	0.06	0.21	0.25	0.20

En la **Tabla 7.8** se indican los porcentajes de variación de los valores puntuales de Hs tomando como referencia el valor obtenido para el nivel medio del mar.

Tabla 7.8. Porcentajes de variación de la altura de ola para distintos niveles del mar

Ubicación	Swell ENE H=0.72 Tp=15		Viento ENE H=1.25 Tp=5		Viento E H=1.75 Tp=6		Swell E H=2.00 Tp=15	
	N=-0.27	N=6.54	N=-0.27	N=6.54	N=-0.27	N=6.54	N=-0.27	N=6.54
1	1.8	6.4	4.9	-16.0	6.4	-2.0	5.1	-8.0
2	-20.3	-13.0	-4.2	0.0	15.4	7.7	-18.3	-19.0
3	-23.9	-8.7	-10.0	10.0	21.4	28.6	-19.0	-19.0
4	-10.3	-17.9	-9.1	27.3	22.2	16.7	-17.5	-34.9
5	-11.8	15.7	12.5	-12.5	5.3	-5.3	-12.5	4.8
6	-15.0	15.0	33.3	0.0	-16.7	33.3	-21.7	-8.7
7	9.5	-14.3	66.7	0.0	-16.7	16.7	-22.0	-22.0
8	-14.3	-2.9	0.0	-12.5	-8.3	-8.3	-8.5	-9.8
9	35.5	-7.9	-18.3	-19.5	0.0	-22.2	4.3	-24.1
10	-19.6	20.8	-66.3	1.0	-61.2	-18.4	-41.0	10.8
11	24.6	13.3	21.6	-14.4	28.6	-3.1	17.3	2.5
12	20.5	6.2	-9.8	-16.4	-4.5	-16.7	-6.8	-6.8
13	26.7	5.0	20.2	-11.2	-1.1	0.0	6.3	-2.0
14	-21.8	-7.3	-5.1	-15.4	9.5	-16.7	-22.1	-12.4
15	1.5	-17.2	11.1	-15.9	3.4	5.1	-17.5	-19.1
Promedio=	-1.1	-0.5	3.2	-6.4	0.2	1.0	-11.6	-11.2

El resultado de este análisis muestra que no existe una tendencia clara en cuanto al incremento o disminución de la agitación portuaria por efecto de la variación del nivel del mar.

Para los tres primeros casos (escenarios frecuentes), donde se analizan tanto el oleaje local como el oceánico, se pudo observar que los valores de Hs para las ubicaciones puntuales pueden modificarse en un sentido o en otro, pero al promediar la totalidad de estos valores para cada escenario no existe un resultado concluyente que señale una influencia importante del nivel de la marea sobre la agitación.

Para el escenario de oleaje extremo (cuarto caso), los porcentajes de variación para la altura de ola resultaron mayores que los obtenidos para los escenarios frecuentes, pero en ambas situaciones, niveles de bajamar y de pleamar, se observa que la agitación disminuye respecto de los valores correspondientes al nivel medio.

7.5 Sensibilidad a las propiedades reflejantes

Las propiedades reflejantes de las estructuras interiores de un puerto constituyen un dato de la modelación que en la práctica habitual de la ingeniería resulta difícil de establecer con precisión, dado que las mismas dependen tanto de las características del oleaje incidente (período y pendiente de la ola) como así también de las particularidades físicas de las estructuras (geometría, materiales que la componen, rugosidad, taludes, etc).

La caracterización de las propiedades reflejantes de una estructura puede realizarse a través del coeficiente de reflexión, definido como $C_r = H_{sr}/H_s$, donde H_{sr} representa la altura de ola reflejada y H_s la altura de ola incidente.

En la literatura internacional existen numerosas fórmulas que permiten estimar el valor del coeficiente de reflexión de una estructura para una condición de oleaje determinada. Las **Tablas 7.9 y 7.10** muestran un conjunto de expresiones de cálculo para C_r obtenidas por distintos autores , y recomendadas por el Coastal Engineering Manual (CEM) .

Particularmente en el caso de estructuras a talud, está claro que la capacidad reflejante no es una propiedad de la estructura solamente sino que depende de la ola incidente (altura, período).

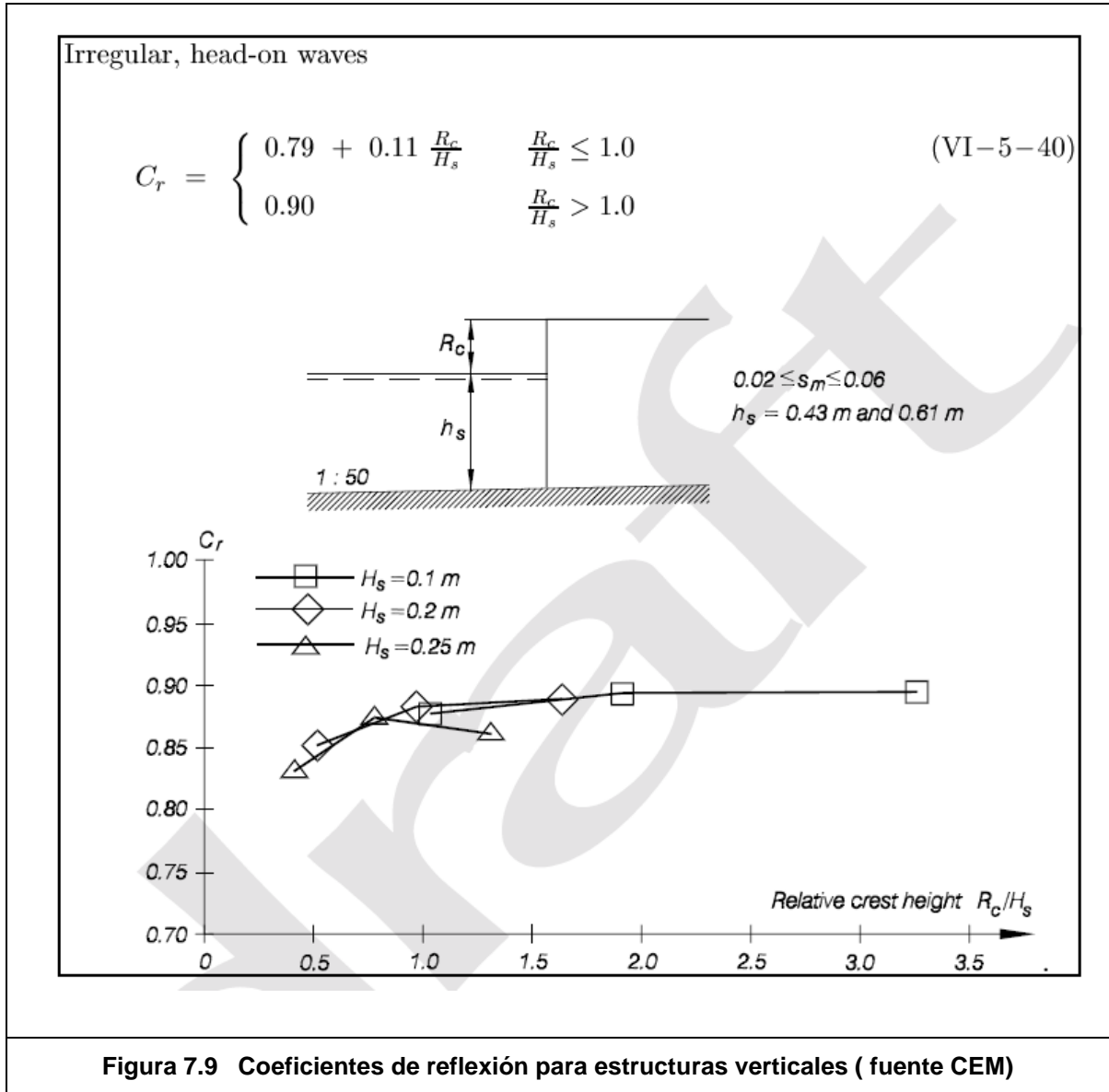


Table VI-5-14
Wave Reflection coefficients for Non-Overtopped Sloping Structures Based on Seelig (1983) Equation

Head-on waves

$$C_r = \frac{a \xi^2}{(b + \xi^2)} \quad \xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{2\pi H}{gT^2}}} \quad (\text{VI-5-38})$$

For irregular wave H is replaced by H_s , T is replaced either by T_p (ξ_{op}) or T_m (ξ_{om}).

Fitted coefficients in Eq VI-5-38

Author	Structure	a	b
Seelig (1983) $2.5 \leq \xi \leq 6$	Impermeable, smooth, straight slopes, regular waves	1.0	5.5
Allsop and Hettiarachchi (1988) range of ξ or ξ_{op} shown in Figure VI-5-18	Dolosse, regular waves (ξ) Slope 1:1.5, 1:2, 1:3	0.56	10.0
	Cobs, regular waves (ξ) Slope 1:1.5, 1:2, 1:3	0.50	6.54
	Tetrapods and Stabit, irregular waves (ξ_{om}) Slope 1:1.33, 1:1.5, 1:2	0.48	9.62
Allsop (1990) $3 \leq \xi_{om} \leq 6$	Shed and Diode, irregular waves (ξ_{om}) Slope 1:1.33, 1:1.5, 1:2	0.49	7.94
	Smooth and impermeable	0.96	4.8
	1-layer rock and stone underlayer on impermeable slope (P=1)	0.64	7.22
Benoit and Teisson (1994) $2.7 \leq \xi_{op} \leq 7$	2-layer rock and stone underlayer on impermeable slope (P=1)	0.64	8.85
	2-layer rock armor $H_s : 0.03 - 0.09m$, $T_p = 1.3s$, $d = 0.4m$ Slope 1:1.33, 1:1.5, 1:2	0.6	6.6
Davidson et al. (1994) $8 \leq \xi_{op} \leq 50$	Field measurement on rock slope 1:1.1 Water depth h in meters		
	$h > 3.25$	0.65	25
	$2.5 \leq h \leq 3.25$	0.60	35
	$h < 2.5$	0.64	80

Figura 7.10 Coeficientes de reflexión para estructuras en talud (fuente CEM)

En el caso de estructuras verticales (**Figura 7.9**), puede notarse que $C_r \approx 0.9$ si la estructura no es rebasable, y disminuye a $C_r \approx 0.8$ para estructuras fuertemente rebasadas. Siguiendo algunos de los modelos de Allsop (**Figura 7.10**) para estimar el coeficiente de reflexión de los tramos de estructura a talud del puerto, puede adoptarse $a = 0.5$ y $b = 8$, con lo que resulta un coeficiente de reflexión para la escollera $C_r \approx 0.35$ para olas de viento de $H=0.5$ m y $T=6$ s de período, y $C_r \approx 0.45$ para el swell típico de 12 s

En esta aplicación del modelo para el estudio de la agitación en el Puerto de Comodoro Rivadavia, las propiedades reflejantes de las estructuras se han representado por medio de un coeficiente de amortiguamiento de energía α (damping), el cual se ha mantenido constante para cada estructura en la totalidad de las simulaciones realizadas. La expresión utilizada para vincular al coeficiente de reflexión C_r con el coeficiente de amortiguamiento α fue la siguiente:

$$C_r = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha} \quad [7.1]$$

La relación funcional [7.1] se muestra en la **Figura 7.11**. Para los coeficientes de reflexión de las estructuras a talud estimados precedentemente, los coeficientes de absorción resultantes están en el orden de $\alpha = 0,4$ a $0,5$. En el caso de una estructura vertical resulta $\alpha \approx 0.05$.

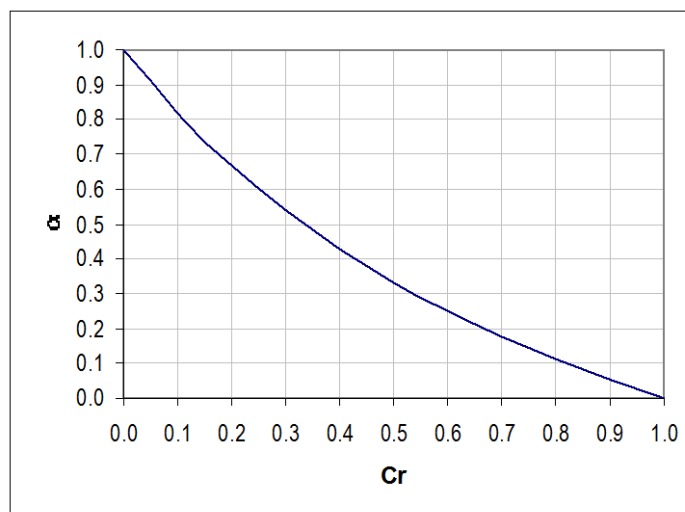


Figura 7.11 Coeficientes de reflexión y absorción

Tanto la aplicación de los modelos empíricos como el reconocimiento in situ de las particularidades de los contornos del puerto contribuyeron a establecer por una parte las características altamente reflejantes de bordes correspondientes a los sectores del Muro Norte, el Muro Oeste y la zona interior de la Dársena de Servicio, para los cuales se adoptó el valor de $\alpha = 0.1$ para el coeficiente de amortiguamiento, habida cuenta de que no es un muro estrictamente vertical, y que su frente no es completamente plano. También se observaron las propiedades reflejantes muy inferiores para el sector de la escollera constituida por un talud de enrocado, para la cual se adoptó el valor de $\alpha = 0.5$.

En esta sección del informe se presenta un análisis de la influencia que puede tener en la modelación la alteración de las propiedades reflejantes de las estructuras internas sobre las características de la agitación portuaria. Siguiendo este propósito, se realizaron un conjunto de simulaciones numéricas adicionales en las cuales se introdujeron modificaciones en los coeficientes de amortiguamiento respecto de los valores utilizados originalmente. Concretamente, se analizó el caso de dos configuraciones en las cuales se incrementan (Más Reflexión) y se disminuyen (Menos Reflexión), respectivamente, las características reflejantes de las estructuras respecto de la condición inicial (Normal), tal como se resume en la **Tabla 7.11**

Tabla 7.11. Coeficientes de amortiguamiento para distintas condiciones de reflexión

Condición de reflexión	Amortiguamiento en zona reflejante	Amortiguamiento en Escollera
Normal	$\alpha=0.1$	$\alpha=0.5$
Más Reflexión	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.4$
Menos Reflexión	$\alpha=0.15$	$\alpha=0.6$

Bajo esta condiciones se estudiaron cuatro escenarios diferentes, considerando dos casos con oleaje frecuente y otros dos con oleaje extremo. En las **Tablas 7.12 y 7.13** se presentan los escenarios analizados conjuntamente con los valores puntuales de altura de ola obtenidos para cada una de estas simulaciones.

Tabla 7.12. Valores de Hs (m) para distintas condiciones de reflexión – Escenarios frecuentes

Ubicación	Escenario Swell ENE H=0.72 Tp=15			Escenario Viento ENE H=1.25 Tp=5		
	Normal	Mas Reflex	Menos Reflex	Normal	Mas Reflex	Menos Reflex
1	0.68	0.68	0.68	1.06	1.09	1.10
2	0.07	0.07	0.07	0.02	0.03	0.02
3	0.05	0.05	0.04	0.01	0.01	0.01
4	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01
5	0.05	0.06	0.05	0.02	0.02	0.02
6	0.02	0.03	0.02	0.00	0.01	0.00
7	0.02	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00
8	0.04	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01
9	0.15	0.19	0.14	0.08	0.09	0.08
10	0.26	0.30	0.25	0.10	0.11	0.10
11	0.20	0.23	0.20	0.13	0.13	0.13
12	0.11	0.13	0.11	0.06	0.07	0.06
13	0.16	0.18	0.16	0.09	0.09	0.09
14	0.11	0.13	0.10	0.04	0.04	0.04
15	0.13	0.14	0.13	0.06	0.07	0.06

Tabla 7.13. Valores de Hs (m) para distintas condiciones de reflexión – Escenarios extremos

Ubicación	Escenario Swell E H=2 Tp=15			Escenario Viento ENE H=2.16 Tp=7.6		
	Normal	Mas Reflex	Menos Reflex	Normal	Mas Reflex	Menos Reflex
1	2.22	2.20	2.24	1.97	1.98	1.97
2	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.11
3	0.09	0.10	0.08	0.06	0.06	0.06
4	0.08	0.10	0.08	0.07	0.09	0.07
5	0.11	0.14	0.09	0.09	0.11	0.08
6	0.06	0.09	0.05	0.03	0.06	0.02
7	0.06	0.10	0.05	0.03	0.05	0.02
8	0.07	0.10	0.06	0.04	0.04	0.04
9	0.25	0.30	0.22	0.33	0.29	0.33
10	0.46	0.55	0.41	0.38	0.38	0.42
11	0.37	0.43	0.34	0.43	0.47	0.43
12	0.23	0.28	0.21	0.23	0.21	0.24
13	0.30	0.34	0.28	0.39	0.41	0.38
14	0.20	0.23	0.18	0.14	0.15	0.15
15	0.20	0.22	0.20	0.25	0.26	0.25

La **Tabla 7.14** muestra los valores porcentuales de las diferencias obtenidas en los valores puntuales de Hs para las condiciones de mayor y menor reflexión, respecto de la condición Normal. Además del valor correspondiente a cada ubicación puntual se señala el valor promedio de la variación porcentual de la altura de ola obtenido para cada caso.

Cabe aclarar que en esta tabla los valores positivos indican incremento de agitación respecto de la condición Normal, mientras que por el contrario, los valores negativos señalan una disminución en la altura de ola.

Tabla 7.14. Porcentajes de variación de Hs para distintas condiciones de reflexión

Ubicación	Swell ENE frecuente		Viento ENE frecuente		Swell E extremo		Viento ENE extremo	
	Más reflex	Menos Reflex	Más reflex	Menos Reflex	Más reflex	Menos Reflex	Más reflex	Menos Reflex
1	-0.1	0.1	2.8	2.9	-1.0	0.8	0.4	-0.2
2	4.3	-4.3	4.2	0.0	5.2	-2.6	6.2	-0.9
3	8.7	-4.3	10.0	0.0	14.1	-7.1	14.3	-1.8
4	12.8	-2.6	9.1	0.0	15.9	-8.5	18.9	-9.5
5	13.7	-5.9	18.8	-6.3	27.5	-15.6	21.8	-10.3
6	55.0	-20.0	100.0	-33.3	42.9	-22.2	80.6	-32.3
7	71.4	-23.8	33.3	0.0	51.6	-26.6	75.0	-25.0
8	40.0	-17.1	25.0	-12.5	37.8	-20.3	7.5	0.0
9	26.3	-9.2	11.0	-1.2	22.0	-9.4	-11.0	2.1
10	15.7	-0.8	11.2	-2.0	20.2	-10.2	0.0	9.4
11	13.3	-2.5	0.0	0.8	15.5	-7.1	7.8	-0.9
12	19.6	-5.4	6.6	-1.6	19.2	-10.3	-11.3	5.2
13	8.7	-2.5	0.0	2.2	13.2	-5.7	6.4	-3.6
14	13.6	-6.4	2.6	0.0	16.2	-8.6	2.1	3.5
15	7.5	-2.2	3.2	0.0	8.9	-3.4	4.0	-1.2
Prom. total=	20.7	-7.1	15.8	-3.4	20.6	-10.5	14.9	-4.4
Prom. Inter=	38.6	-13.9	37.2	-10.4	35.1	-18.6	40.8	-15.4

Analizando el promedio correspondiente al total de puntos puede advertirse que los incrementos en la agitación inducidos por el aumento de la reflexión puede variar en un orden de entre un 14.9% y 20.7%, según se trate de escenarios de viento o de swell, respectivamente. Las variaciones en la altura de ola producidas por la reducción de la reflexión de las estructuras también son mayores para el caso de swell que para el viento, observándose disminuciones en los valores de Hs que promedian entre un -10.5% y -3.4%, respectivamente.

Si se analizan los porcentajes referidos solamente a los puntos interiores del puerto puede advertirse que en este caso las variaciones en la agitación resultan significativamente superiores a las del promedio total, lo cual es razonable dado que al tratarse del sector más protegido del oleaje la incidencia de la alteración de las características reflejantes de las estructuras debería ser más notoria.

En este caso, los incrementos porcentuales en los valores de Hs inducidos por el aumento de la reflexión pueden variar en un orden de entre el 40.8% y 35.1%, y a diferencia de lo que ocurre

al considerar el total de puntos, dicho incremento es más importante para los escenarios de viento que para los de swell. Para el caso de la reducción de la reflexión, la agitación puede disminuir en un orden de entre el -18.6% y el -10.4% , siendo más importante para las situaciones de escenarios extremos, y fundamentalmente, para el caso de swell.

Es importante destacar que a pesar de la importancia que se puede observar en el valor porcentual de estos incrementos, los niveles de agitación dentro del puerto permanecen por debajo del umbral de admisibilidad recomendado por la norma ROM ($H_s < 0.4$ m), tal como se aprecia en las **Tablas 7.12 y 7.13**. Es decir que, aún bajo las condiciones de reflexión más desfavorables analizadas en este informe, la configuración portuaria estudiada resulta eficiente, tanto para permitir la operación de las embarcaciones en situaciones frecuentes, como así también para mantener condiciones de seguridad apropiadas frente a la ocurrencia de temporales intensos.

8 CONCLUSIONES FINALES

En esta Segunda Parte del estudio se analizó la agitación inducida por el oleaje en el interior del puerto de Comodoro Rivadavia. La información para la definición de condiciones de oleaje se basó en los resultados obtenidos en la Parte 1 de este estudio, donde se detallan en profundidad las características del clima de olas en dicha región.

Mediante la aplicación del modelo numérico BOUSS-2D se estudiaron los aspectos hidráulicos vinculados a la agitación portuaria inducida por el oleaje, tanto para la configuración actual del puerto como para un conjunto de alternativas de configuración de la planta portuaria. Siete de las variantes se basaron en la modificación de obras de abrigo ya existentes, y un octavo caso consistió en una estructura de protección separada (dique exento).

A partir de esos resultados se desarrolló un análisis comparativo del funcionamiento de las alternativas propuestas desde el punto de vista de la atenuación de la altura de ola en el interior del puerto.

El proceso de evaluación de las alternativas implicó tanto aspectos técnicos como económicos y demandó consecuentemente la interacción entre la DGIP y el INA. El mismo fue desarrollado en tres etapas conforme se fueron obteniendo los resultados. Este proceso concluyó con la elección de la alternativa de prolongar la escollera actual en una longitud de $L=400$, como opción más conveniente para el proyecto.

La opción seleccionada fue estudiada con mayor profundidad, realizándose un número significativo de simulaciones numéricas que contribuyeron a evaluar en mayor detalle su eficiencia para la atenuación del oleaje exterior bajo un conjunto amplio de situaciones de oleaje.

Los resultados de la modelación señalaron que para la ocurrencia de escenarios frecuentes de oleaje con la configuración seleccionada se reducirán sustancialmente los niveles de agitación en el interior del puerto, lo cual se traducirá en una importante mejora para la operación del

mismo. Comparando estos resultados con los obtenidos para la condición actual, pudo estimarse que la prolongación de la escollera en una longitud de $L=400$ m generará reducción en la altura de ola en el área portuaria del orden del 80% para escenarios de oleaje local frecuente y del 70% para el oleaje oceánico frecuente.

Se han estudiado además condiciones de oleaje extremo, asociados a períodos de retorno de $T_r=50$ años, y en todos los casos pudo verificarse que la nueva configuración brinda condiciones de seguridad (Según norma ROM $H_s < 0.4$ m) apropiadas para las embarcaciones.

También se analizó la influencia de la marea sobre las condiciones de agitación en el área portuaria. Sobre este aspecto, la modelación de diferentes escenarios definidos con oleaje frecuente y extremo para condiciones de bajamar, nivel medio, y pleamar, respectivamente, demostró que no se observan cambios significativos en la altura de ola por efectos de la marea.

Finalmente, se estudió la sensibilidad de la configuración frente a la variación de las propiedades reflejantes del contorno. Los resultados mostraron que si bien hay sectores que pueden resultar sensibles al efecto de la reflexión, los niveles de la agitación en el área portuaria permanecen acotados y, en todos los casos analizados se mantuvieron por debajo de los límites de admisibilidad recomendados.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. “A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors” Nwogu, O. G. and Demirebilek, Z.. Report 1: Theoretical Background and User`s Manual. 2001
2. “Coastal Engineering Manual” (CEM). United States Army, Corps of Engineers, 2001
3. “Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)” Ministerio de Fomento de España. Puertos del Estado. 2000

ANEXO I

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO BOUSS-2D

BOUSS-2D es un modelo numérico perteneciente al sistema SMS (Surface-Water Modeling System) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. El mismo se encuentra basado en una solución dominio-tiempo de ecuaciones tipo Boussinesq.

La forma clásica de las ecuaciones de Boussinesq para la propagación del oleaje en aguas de profundidad variable fue derivada por Peregrine (1967). La aplicación de estas ecuaciones se encuentra restringida a zonas de aguas relativamente poco profundas dado que se asume que una variación cuadrática para el perfil de velocidades verticales, lo cual puede considerarse válido para los casos donde se cumple que la profundidad del agua, h , sea menor que la quinta parte de la longitud de onda incidente, L .

Nwogu (1993) extendió el rango de aplicabilidad de estas ecuaciones rescribiéndolas en términos de una velocidad arbitraria definida a una distancia $Z\alpha$ del nivel estático de la superficie del agua, en lugar de la velocidad promediada en la profundidad utilizada en la versión original. De esta manera, la elevación de la variable de velocidad $Z\alpha$ se transforma en un parámetro libre que se elige para optimizar las características de la dispersión lineal de las ecuaciones. Este nuevo planteo de las ecuaciones permite su aplicación en zonas de aguas de profundidades intermedias, donde h puede llegar hasta $\frac{1}{2}$ de la longitud de onda incidente.

A pesar de la mejora introducida por Nwogu (1993) las ecuaciones se encontraban basadas sobre la hipótesis de que las alturas de ola debían ser mucho menores que la profundidad. Esto limitaba la posibilidad de describir procesos fuertemente no lineales en aguas poco profundas, lo cual, condujo a Wei et al. (1995) a derivar la forma completamente no lineal de las ecuaciones. Este nuevo aporte resultó particularmente útil para la simulación de ondas altamente asimétricas en aguas poco profundas, corrientes inducidas por oleaje, wave setup cercano a la línea de costa, y la interacción ola-corriente.

Dada la importancia de los procesos de turbulencia y corrientes generadas por el rompimiento de olas, los cuales conducen los mecanismos de transporte de sedimentos y contaminantes, Nwogu (1996) extendió la forma completamente no lineal de las ecuaciones tipo Boussinesq a la zona de surf. Para ello acopló las ecuaciones de

conservación de masa y momento con un modelo de evolución espacial y temporal para la energía cinética de la turbulencia producida por el rompimiento de olas.

Estas ecuaciones han sido modificadas también para incluir los efectos de fricción de fondo y caudal a través de estructuras porosas, y pueden ser utilizadas para simular la mayoría de los fenómenos de interés en el ámbito de la ingeniería de costas y puertos, como ser:

- Bajío.
- Refracción.
- Difracción.
- Reflexión parcial o total.
- Fricción de fondo.
- Interacción no lineal entre distintas componentes de onda.
- Rompimiento de olas y Run-up.
- Corrientes inducidas por acción del oleaje.
- Interacción entre olas y corrientes.

1 Planteamiento del problema matemático

El perfil vertical del campo de caudal puede ser obtenido a partir de la expansión de la función potencial de velocidades, Φ , como una serie de Taylor alrededor de una elevación arbitraria, z_α , en la columna de agua. Para ondas con longitud, L , mucho mayor que la profundidad, h , la serie es truncada al segundo orden, resultando una variación cuadrática del potencial de velocidad sobre la profundidad:

$$\Phi(\bar{x}, z, t) = \phi_\alpha + \mu^2 (z_\alpha - z) [\nabla \phi_\alpha \cdot \nabla h] + \frac{\mu^2}{2} [(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2] \nabla^2 \phi_\alpha + O(\mu^4)$$

donde $\phi_\alpha = \Phi(\bar{x}, z_\alpha, t)$, $\nabla = (\partial / \partial x, \partial / \partial y)$, y $\mu = h / L$ es una medida de la dispersión de frecuencia. Las velocidades horizontal y vertical son obtenidas de la función potencial como:

$$u = (\bar{x}, z, t) = \nabla\Phi = u_\alpha + (z_\alpha - z)\left[\nabla(u_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla u_\alpha) \cdot \nabla h\right] + \frac{1}{2}\left[(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2\right]\nabla(\nabla u_\alpha)$$

$$w = (\bar{x}, z, t) = \frac{\partial\Phi}{\partial z} = -\left[u_\alpha \cdot \nabla h + (z + h) \cdot \nabla u_\alpha\right]$$

donde $u_\alpha = \nabla\Phi|_{z_\alpha}$ es la velocidad horizontal en la posición $z = z_\alpha$. Dado un perfil vertical para el campo de caudal, las ecuaciones de continuidad y de Euler (momentum) pueden ser integradas sobre la profundidad, reduciendo el problema tridimensional a uno de dos dimensiones. Para olas débilmente no lineales, con H mucho menor que la profundidad, las ecuaciones integradas en la vertical pueden ser escritas en términos de elevación de la superficie del agua $\eta(\bar{x}, t)$ y velocidad $u_\alpha(\bar{x}, t)$, definidas por Nwogu (1993) de la siguiente manera::

$$\eta_t + \nabla u_f = 0 \quad (1)$$

$$u_{\alpha,t} + g \cdot \nabla \eta + (u_\alpha \cdot \nabla) u_\alpha + z_\alpha \left[\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla u_{\alpha,t}) \cdot \nabla h \right] + \frac{1}{2} \left[(z_\alpha + h)^2 - h^2 \right] \nabla(\nabla u_{\alpha,t}) = 0 \quad (2)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y u_f es la densidad del flujo de volumen dado por:

$$u_f = \int_{-h}^{\eta} u \cdot dz = (h + \eta) u_\alpha + h \left[(z_\alpha - \frac{h}{2}) \cdot \left[\nabla(u_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla u_\alpha) \cdot \nabla h \right] + h \cdot \left[\frac{(z_\alpha + h)^2}{2} - \frac{h^2}{6} \right] \nabla(\nabla u_\alpha) \right] \quad (3)$$

La elevación de la variable velocidad, z_α , resulta un parámetro libre cuyo valor óptimo es: $z_\alpha = -0.535h$.

Para zonas de aguas poco profundas donde las alturas de ola son del orden de la profundidad y, por lo tanto, existe la posibilidad del rompimiento, las ecuaciones del planteo débilmente no lineal pierden validez. Para estos casos se recomienda la aplicación de las expresiones derivadas por Nwogu (1996) correspondientes al modelo

fuertemente no lineal, en las cuales puede observarse que aparecen algunos términos expresados en función de la velocidad en la superficie libre, u_η , en lugar de u_α :

$$\eta_t + \nabla u_f = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & u_{\alpha,t} + g \cdot \nabla \eta + (u_\eta \cdot \nabla) u_\eta + w_\eta \cdot \nabla w_\eta + (z_\alpha - \eta) \cdot [\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla u_{\alpha,t}) \cdot \nabla h] \\ & + \frac{1}{2} [(z_\alpha + h)^2 - (h + \eta)^2] \nabla(\nabla u_{\alpha,t}) - [\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (h + \eta) \cdot \nabla u_{\alpha,t}] \nabla \eta \\ & + [\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla u_{\alpha,t}) \cdot \nabla h + (z_\alpha + h) \cdot \nabla(\nabla u_\alpha)]_{z_\alpha} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

donde z_α es ahora función del tiempo y se encuentra dado por $z_\alpha + h = 0.465(h + \eta)$, y la densidad del volumen de flujo es:

$$u_f = (h + \eta) \cdot \left\{ u_\alpha + \left[(z_\alpha + h) - \frac{(h + \eta)}{2} \right] [\nabla(u_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla u_\alpha) \cdot \nabla h] + \left[\frac{(z_\alpha + h)^2}{2} - \frac{(h + \eta)^2}{6} \right] \nabla(\nabla u_\alpha) \right\} \quad (6)$$

Este planteo fuertemente no lineal es apto modelar la mayoría de los procesos que se desarrollan en la zona de surf, incluyendo la interacción ola-corriente. Las hipótesis básicas asumidas por el modelo para la simulación en la zona de rompiente son las siguientes:

- Las olas tienen un rompimiento tipo "spilling"
- La turbulencia es producida en la región cercana a la superficie cuando la velocidad horizontal en la superficie libre, u_η , supera a la velocidad de fase, C .
- La tasa de producción de energía cinética de la turbulencia es proporcional al gradiente vertical de la velocidad horizontal de la superficie libre, $\partial u / \partial z|_{z=\eta}$.
- La turbulencia inducida por el rompimiento es propagada por convección en la región cercana a la superficie con una velocidad igual a la velocidad horizontal de la superficie libre.

La relación de dispersión lineal utilizada en Bouss-2D es la siguiente:

$$C^2 = \frac{L^2}{T^2} = \left[\frac{1 - (\alpha + 1/3)(kh)^2}{1 - \alpha(kh)^2} \right]$$

donde L y T son la longitud y el período de onda, C es la velocidad de fase, $k = 2\pi / L$ es el número de onda, y $\alpha = [(z_\alpha + h)^2 / h^2 - 1] / 2$. Por lo tanto, dependiendo de la elevación de la variable de velocidad, es decir del valor de α , se obtendrán diferentes valores para la relación de dispersión lineal.

2 Solución numérica

Las ecuaciones correspondientes a los planteos débilmente lineal (1 a 3) y fuertemente lineal (4 a 6) son resueltas utilizando un método de dominio-tiempo en diferencias finitas. El dominio computacional es discretizado por medio de una grilla rectangular con pasos de discretización Δx y Δy en las direcciones de los ejes respectivos.

Las variables de la ecuaciones η , u_α y w_α son definidas sobre una grilla de puntos de manera escalonada, siendo la profundidad y elevación de la superficie definidas sobre cada nodo (i,j) de la grilla, mientras que las velocidades se definen sobre puntos intermedios ubicados sobre cada borde celda a una distancia $\Delta x/2$ y $\Delta y/2$ de los nodos, según corresponda el eje ($i \pm 1/2$, $j \pm 1/2$).

Para la resolución numérica de las ecuaciones se utiliza un esquema Crank Nicolson con un método predictor-corrector que permite obtener una estimación inicial. Las derivadas parciales son aproximadas usando un esquema de diferencias hacia delante para el tiempo y diferencias centradas en el espacio.

El proceso de cálculo se mantiene estable siempre y cuando el número de Courant, Cr, sea menor que 1:

$$Cr = \sqrt{\left[C^2 \Delta t^2 \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) \right]} < 1$$

donde C es la velocidad de fase sobre el período de cruce de ceros promedio de las olas incidentes.

Esta condición, necesaria para asegurar la estabilidad del cálculo, impone restricciones sobre la relación entre el tamaño de los pasos de discretización de la grilla y el paso de tiempo utilizado para cada simulación. Es recomendable que en el inicio del proceso de cálculo el valor de Cr permanezca entre 0.5 y 0.7, puesto que la interacción no lineal entre distintas componentes de onda, el rompimiento de olas, la reflexión, y otros procesos físicos pueden afectar la estabilidad del modelo numérico.

3 Condiciones de borde

Para poder resolver las ecuaciones es necesario aplicar condiciones de borde apropiadas sobre los contornos del dominio computacional. Esto requiere la especificación de zonas de ingreso de energía de olas al dominio de cálculo y zonas de absorción y propagación de energía hacia el exterior del dominio. Las ecuaciones también permiten simular la interacción de las olas con las estructuras presentes en el interior del dominio de cálculo, por lo cual, los tipos de bordes considerados en BOUSS-2D son:

- Bordes para la generación externa de olas
- Bordes para la generación interna de olas
- Bordes completamente reflejantes o paredes verticales sólidas
- Regiones de damping o absorción de energía de las olas
- Estructuras porosas.

En la definición de los bordes correspondientes a la generación de olas (wave maker) pueden considerarse características de oleaje tanto regular como irregular. La representación de olas regulares requiere la definición de valores de altura significativa H_s , período pico T_p , y dirección de incidencia. Para la representación del oleaje irregular BOUSS-2D dispone de un menú de espectros unidireccionales $S_{\eta}(\omega)$ que describen la distribución de energía de las olas en función de la frecuencia, estos son:

- Espectro de Pierson-Moskowitz (PM): recomendado para estados de oleaje completamente desarrollado en aguas profundas, definido en términos de velocidad de viento.
- Espectro de Bretschneider (1959): tiene la misma forma que el anterior (PM) pero se define a partir de un valor de H_s y uno de T_p .
- Espectro de JONSWAP: para condiciones de fetch limitado en aguas profundas.

- Espectro TMA: para condiciones de fetch limitado en aguas poco profundas.
- Espectro Ochi-Hubble: espectro bimodal para estados de mar con superposición de olas oceánicas (swell) y olas generadas por vientos locales (wind-sea).

El modelo permite también la utilización de espectros direccionales, para los cuales la energía del oleaje se distribuye no sólo en frecuencia sino también en un rango de direcciones de incidencia:

$$S_{\eta}(\omega, \theta) = S_{\eta}(\omega) \cdot D(\omega, \theta)$$

esto requiere la definición adicional de los parámetros correspondientes para la función $D(\omega, \theta)$, lo cual se encuentra también disponible en BOUSS-2D.

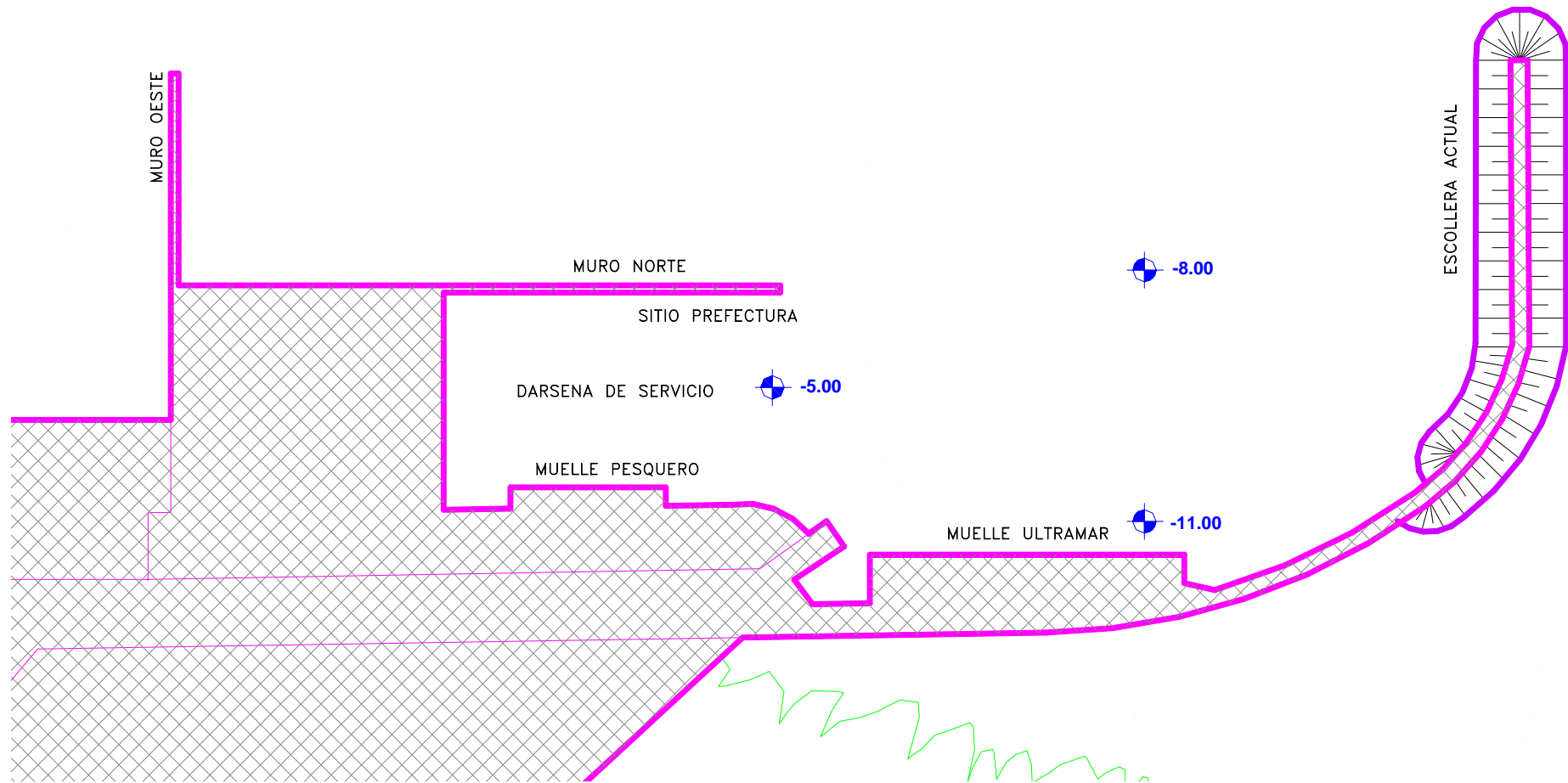
La asignación de propiedades absorbentes o reflejantes para los distintos contornos de una modelación se hace por medio de la definición del coeficiente de damping (α), tanto para bordes que constituyan un límite del dominio de cálculo como para las estructuras interiores.

El coeficiente de damping puede adoptar valores entre 0 y 1, pudiendo representar tanto a paredes verticales totalmente reflejantes ($\alpha=0$), como a bordes oceánicos totalmente absorbentes ($\alpha=1$) que permiten el egreso de un sistema de la energía reflejada. Para regiones parcialmente reflejantes como playas o escolleras con taludes de rocas, se utilizan distintos valores intermedios para α .

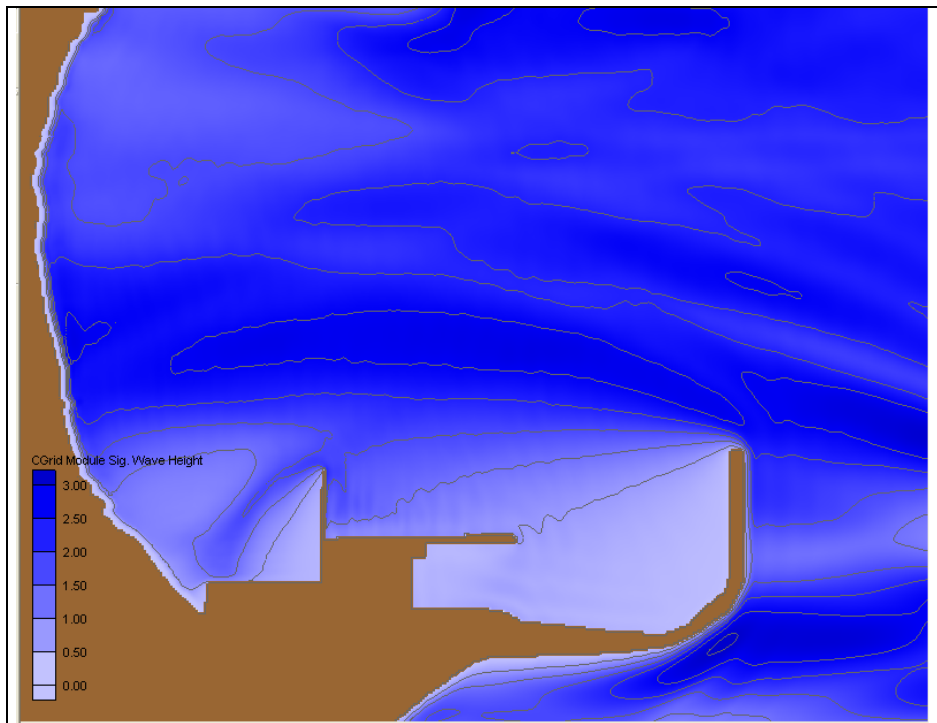
El modelo también permite simular situaciones en las que existen estructuras porosas, como breakwaters, para lo cual admite la asignación para una determinada región del dominio de un coeficiente de porosidad, p , utilizado para representar la disipación de energía generada por la estructura al ser atravesada por el oleaje.

ANEXO II

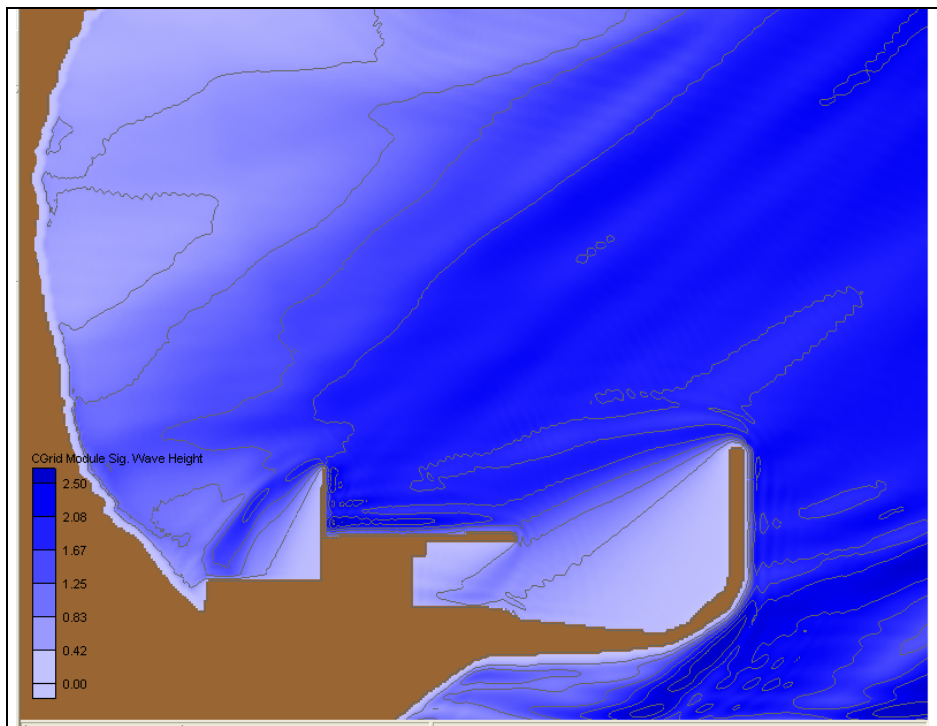
PUERTO CENTRAL DE COMODORO RIVADAVIA



ANEXO III



A-III.1 Configuración Actual. Distribución de Hs (m) para Escenario 1.



A-III.2 Configuración Actual. Distribución de Hs (m) para Escenario 2.

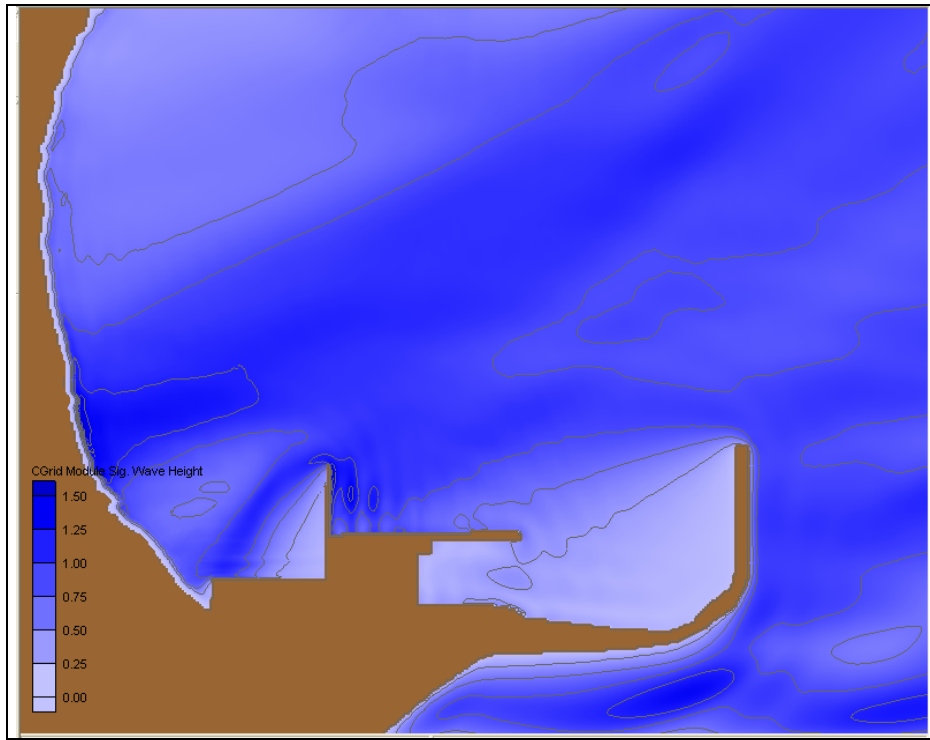


Figura A-III.3 Configuración Actual. Distribución de Hs (m) para Escenario 3.

ANEXO IV

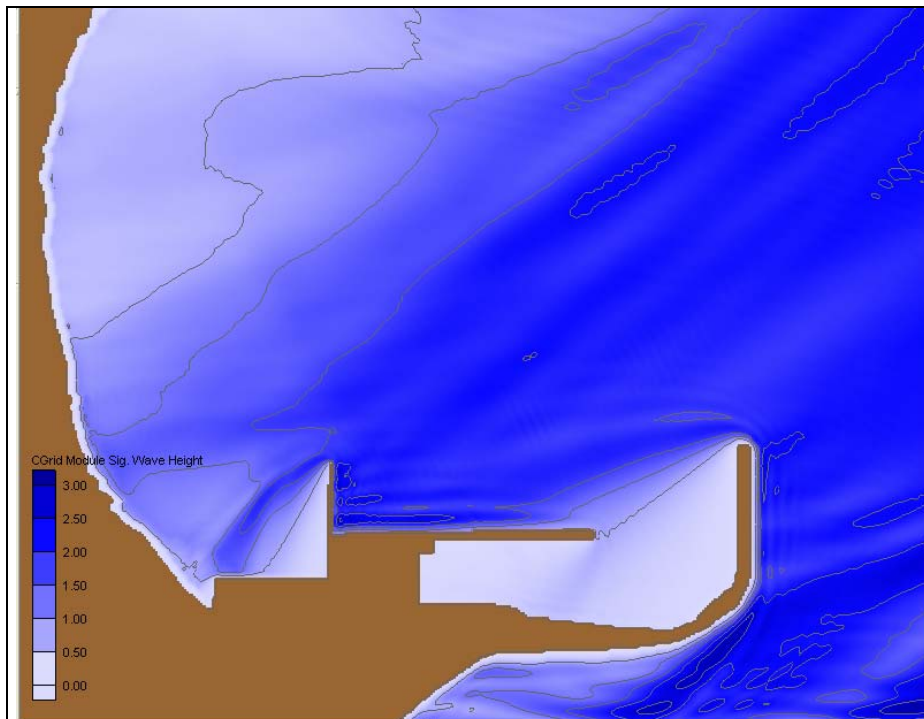


Figura A-IV.1. Muelle 200 - Hs (m) para Escenario 2.



Figura A-IV.2. Dique Exento - Hs (m) para Escenario 2.

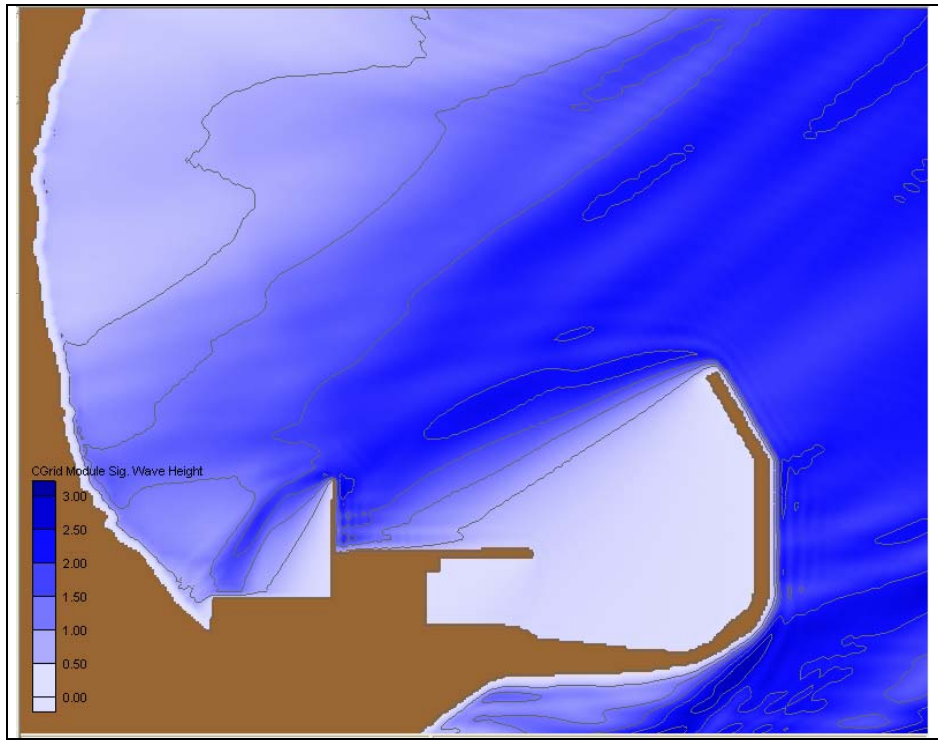


Figura A-IV.3. Escollera inclinada - Hs (m) para Escenario 2.

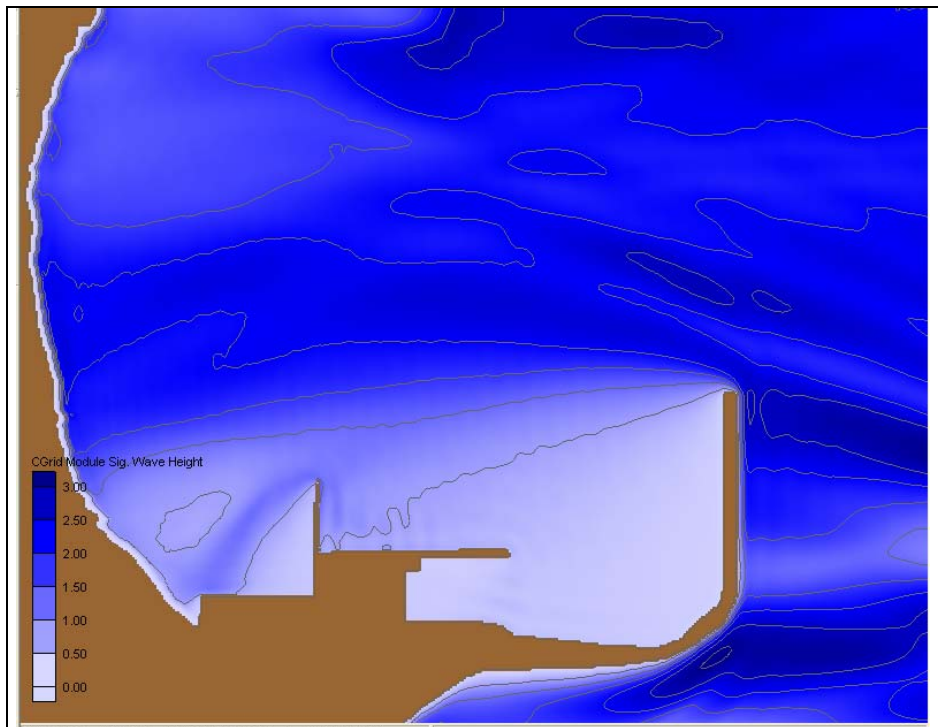


Figura A-IV.4. Escollera 150 - Hs (m) para Escenario 1.

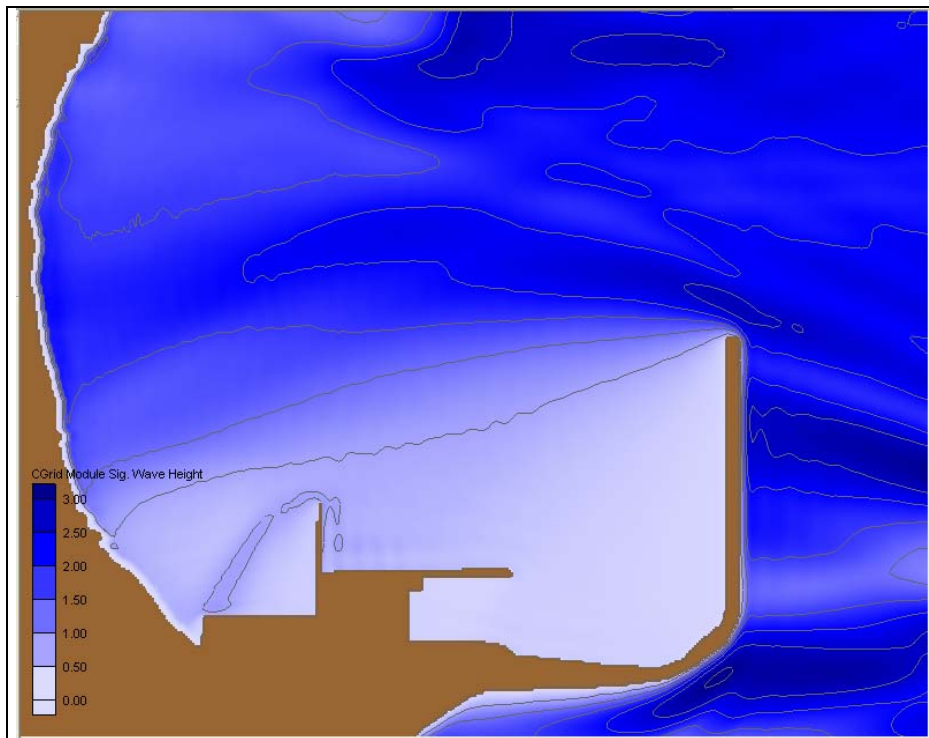


Figura A-IV.5. Escollera 300 - Hs (m) para Escenario 1.

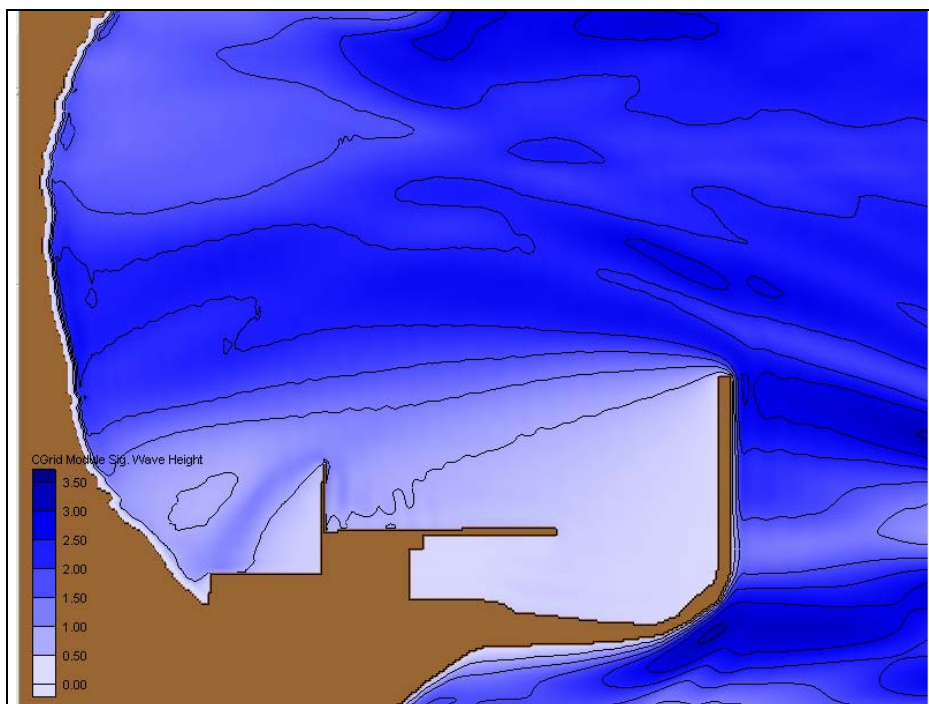


Figura A-IV.6. Solución combinada - Hs (m) para Escenario 1.

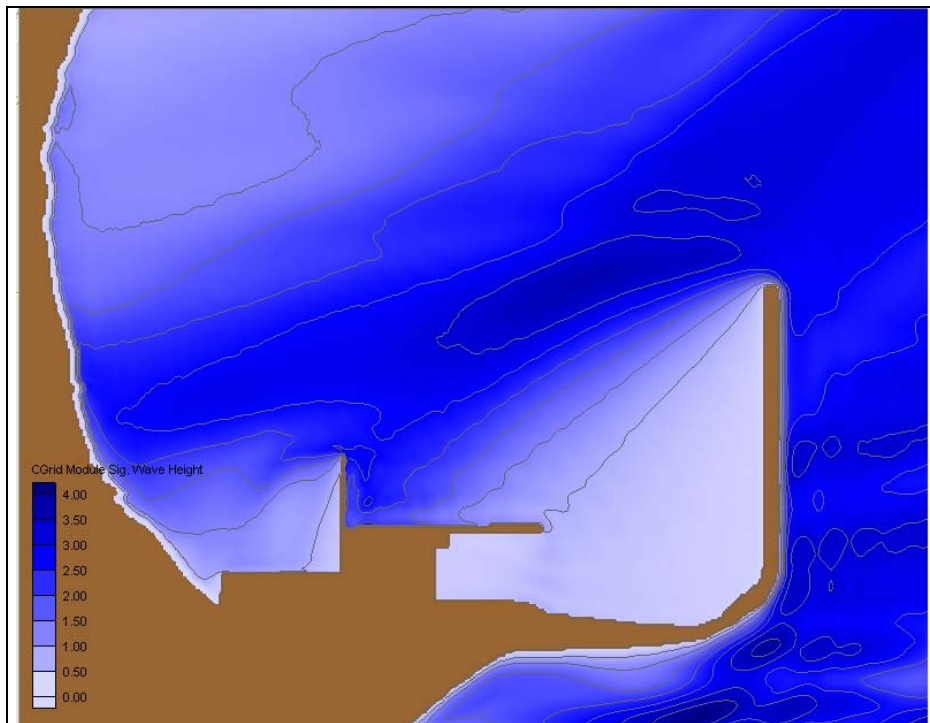


Figura A-IV.7 Escollera 300 - Hs (m) para Escenario 2.

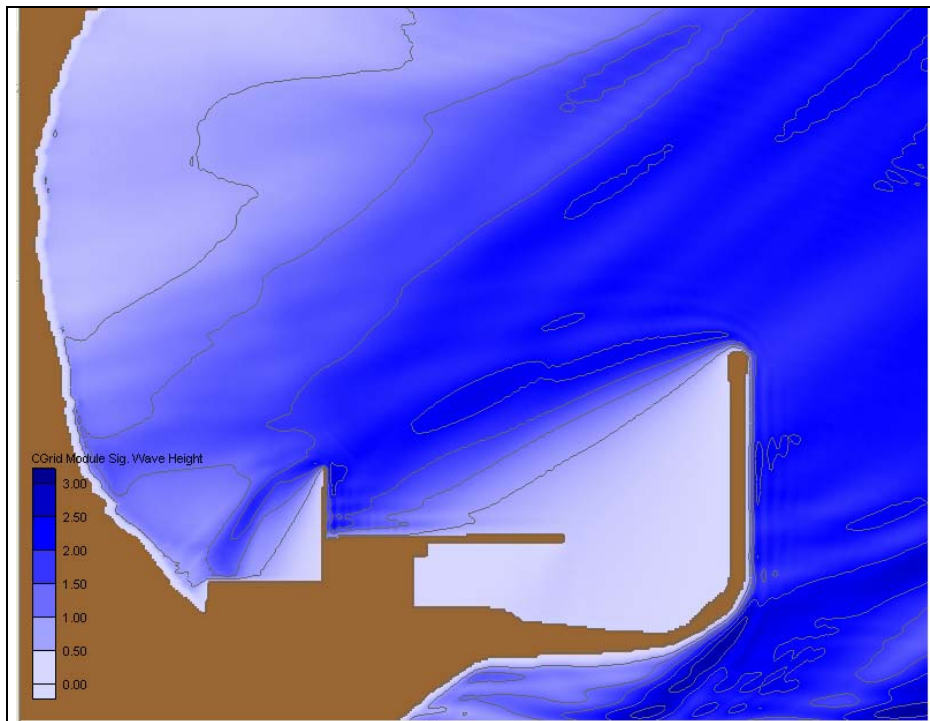


Figura A-IV.8 Solución Combinada 2 - Hs (m) para Escenario 2.

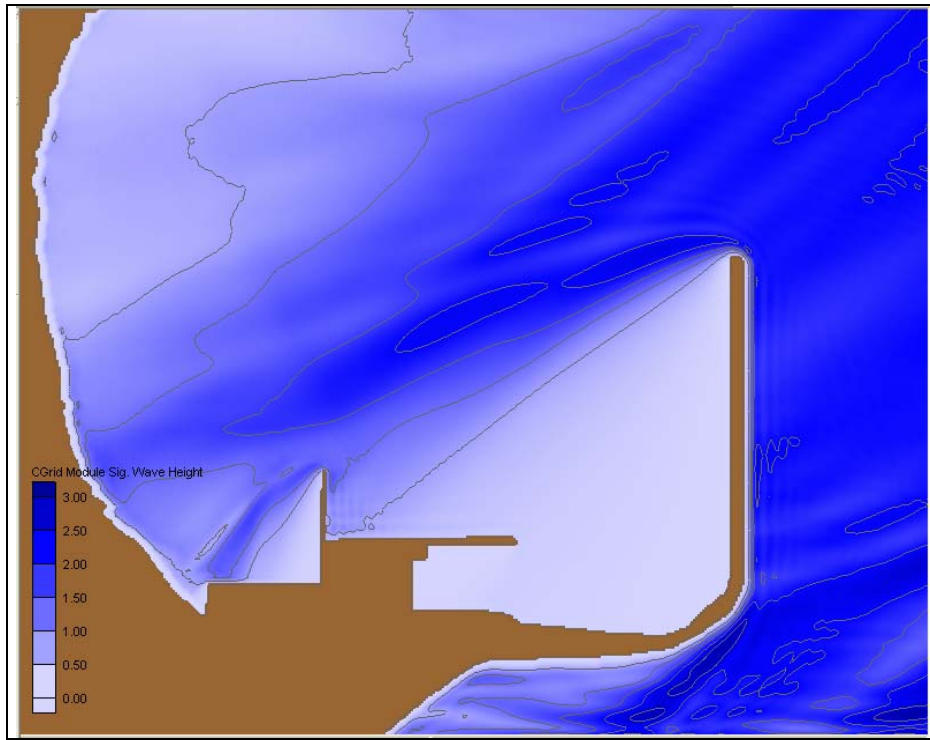


Figura A-IV-9 Escollera 400 - Hs (m) para Escenario 2.

ANEXO V

a) Escenarios Frecuentes

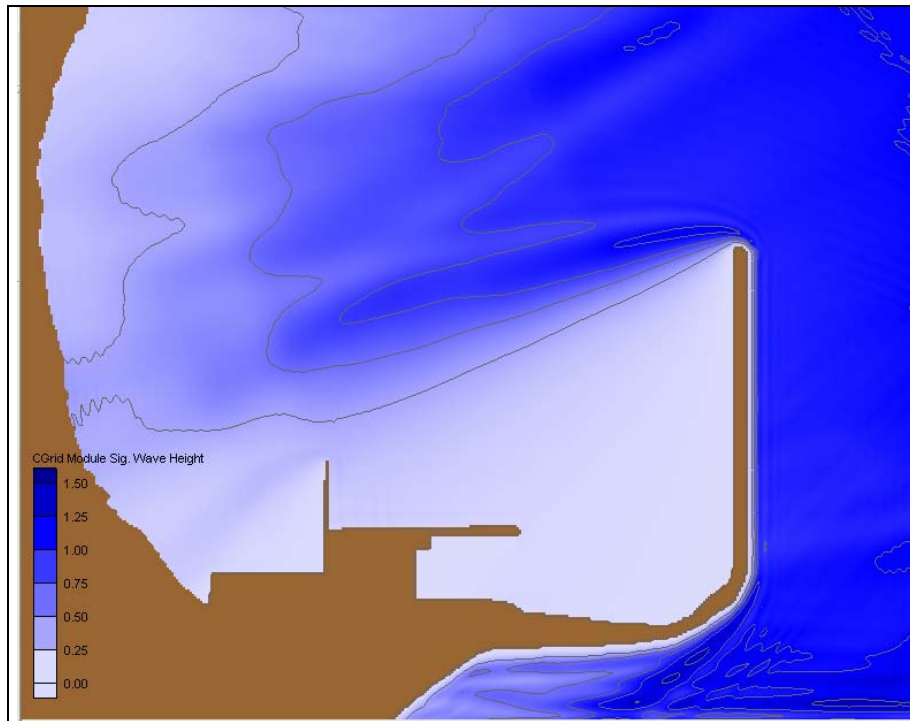


Figura A-V.1. Escenarios frecuentes – Viento ENE

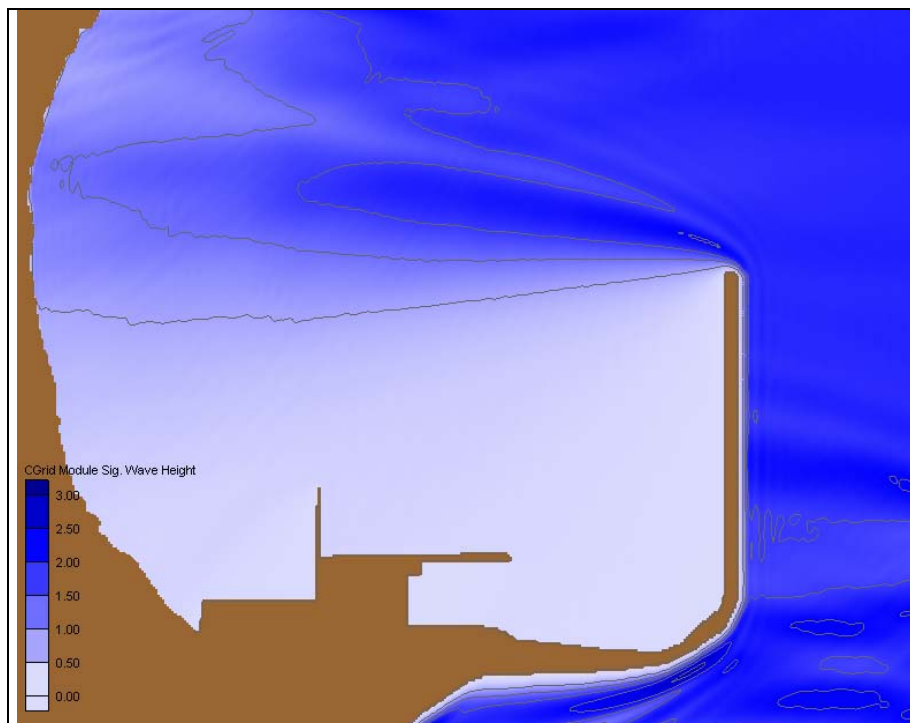


Figura A-V.2. Escenarios frecuentes – Viento E

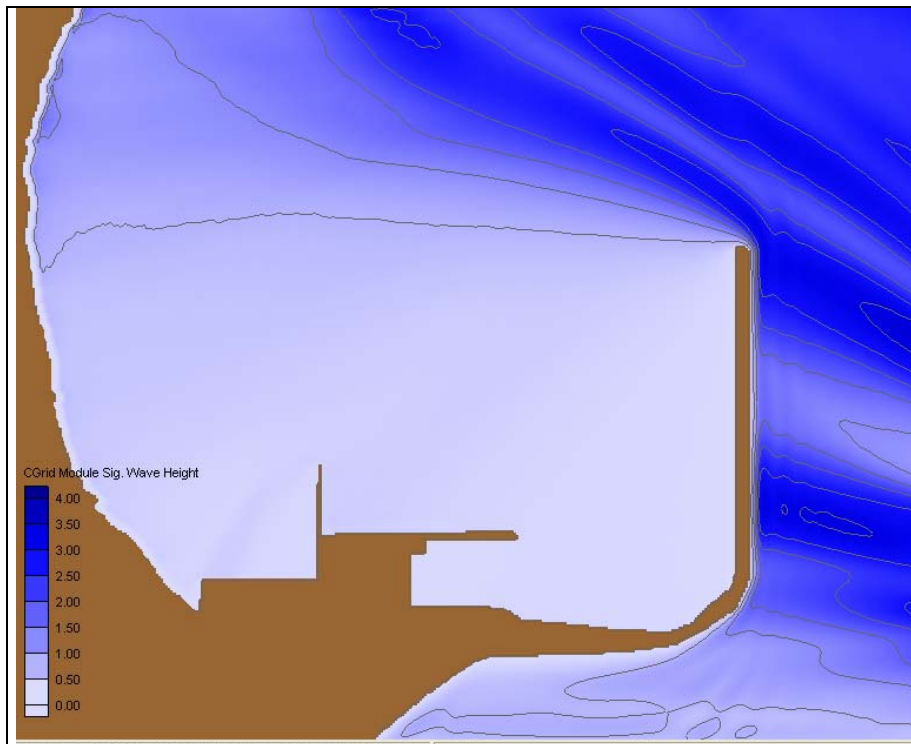


Figura A-V.3. Escenarios frecuentes – Viento ESE

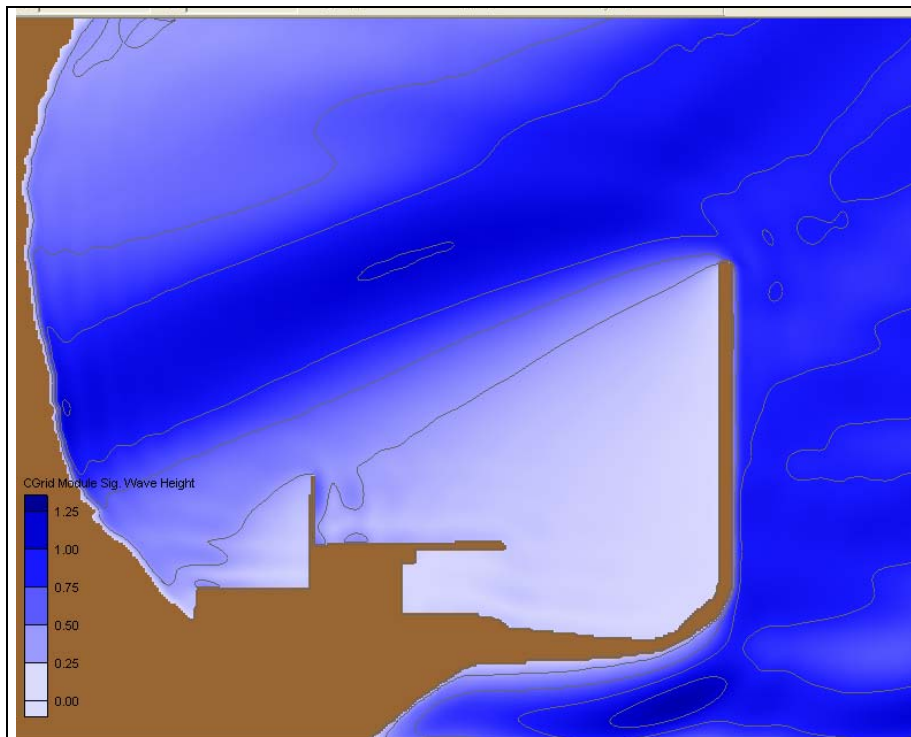


Figura A-V.4. Escenarios frecuentes – Swell ENE

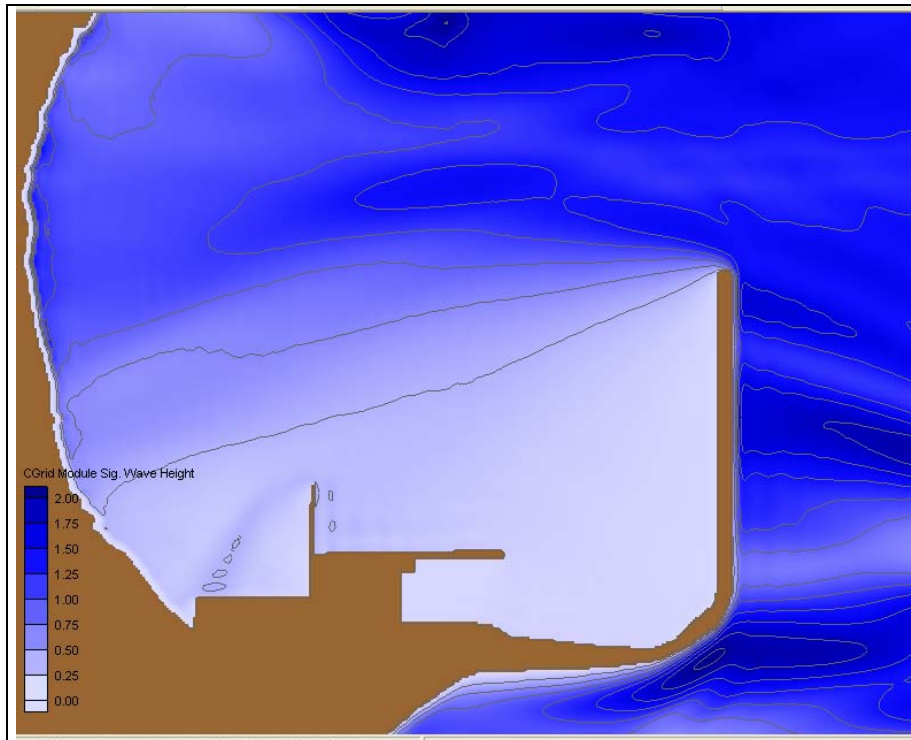


Figura A-V.5. Escenarios frecuentes – Swell E

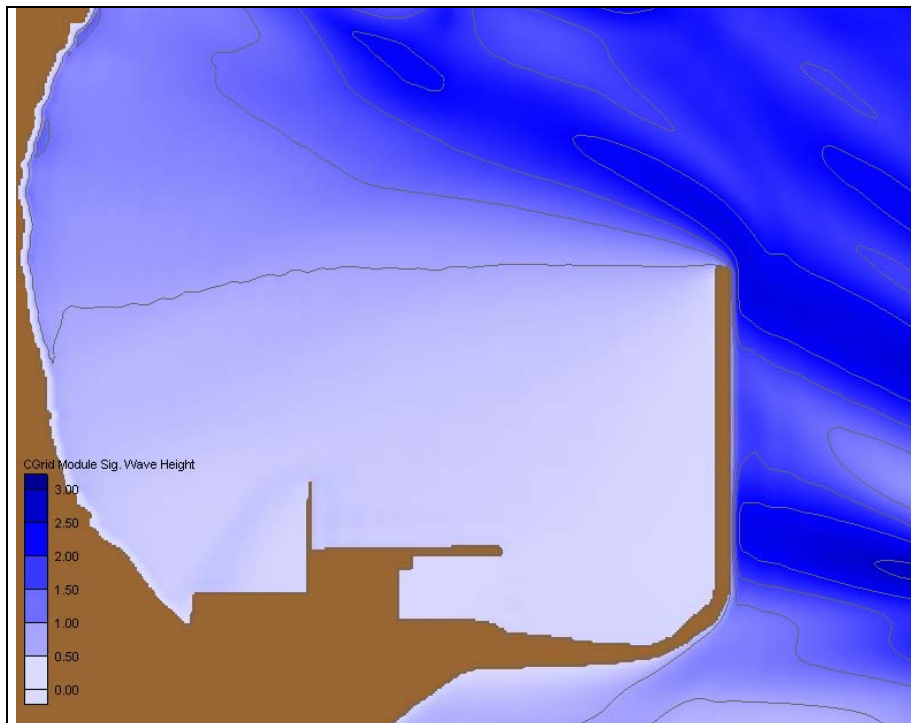


Figura A-V.6. Escenarios frecuentes – Swell ESE

b) Escenarios Extremos

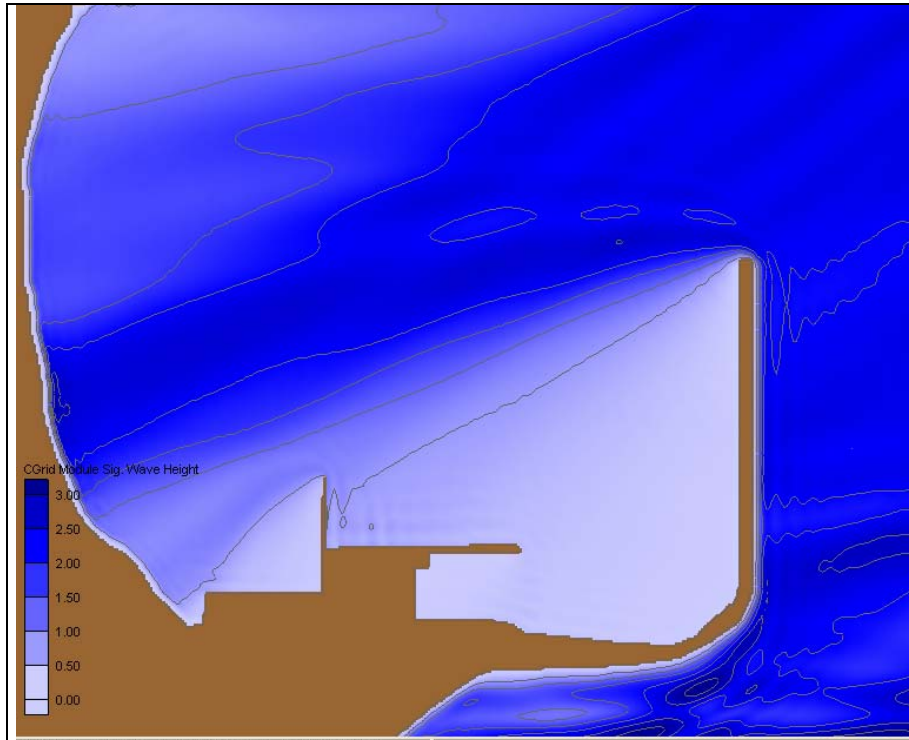


Figura A-V.7. Escenarios extremos – Viento ENE

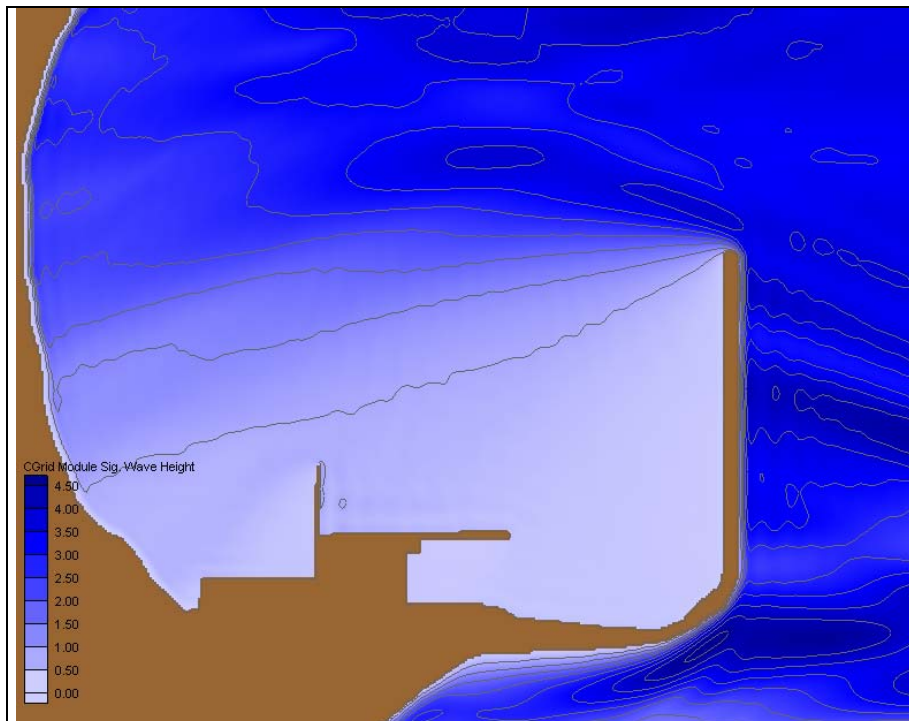


Figura A-V.8. Escenarios extremos – Viento E

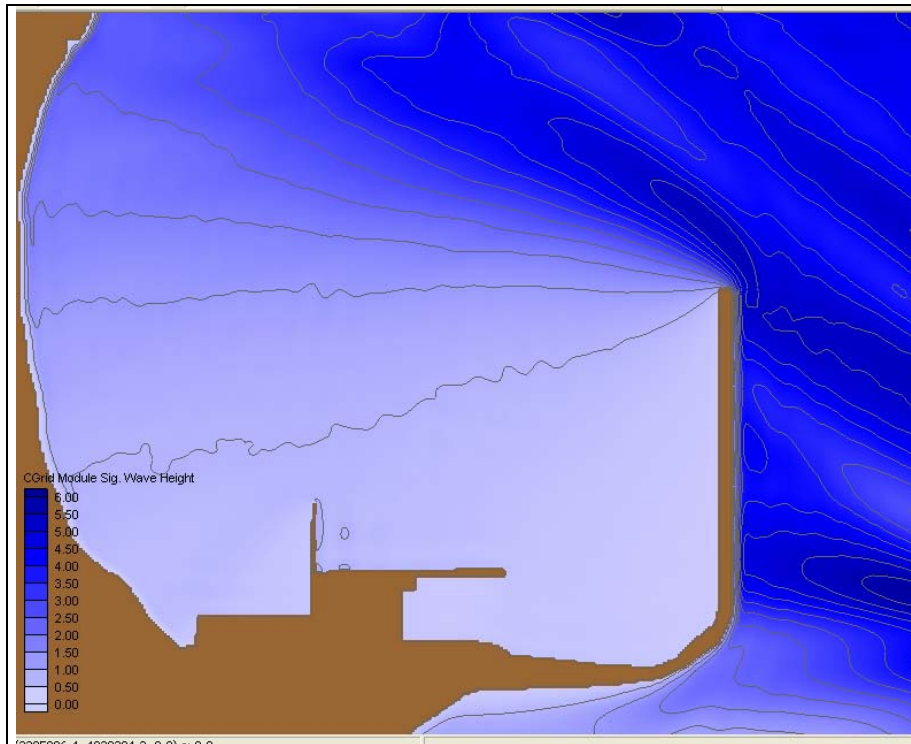


Figura A-V.9. Escenarios extremos – Viento ESE

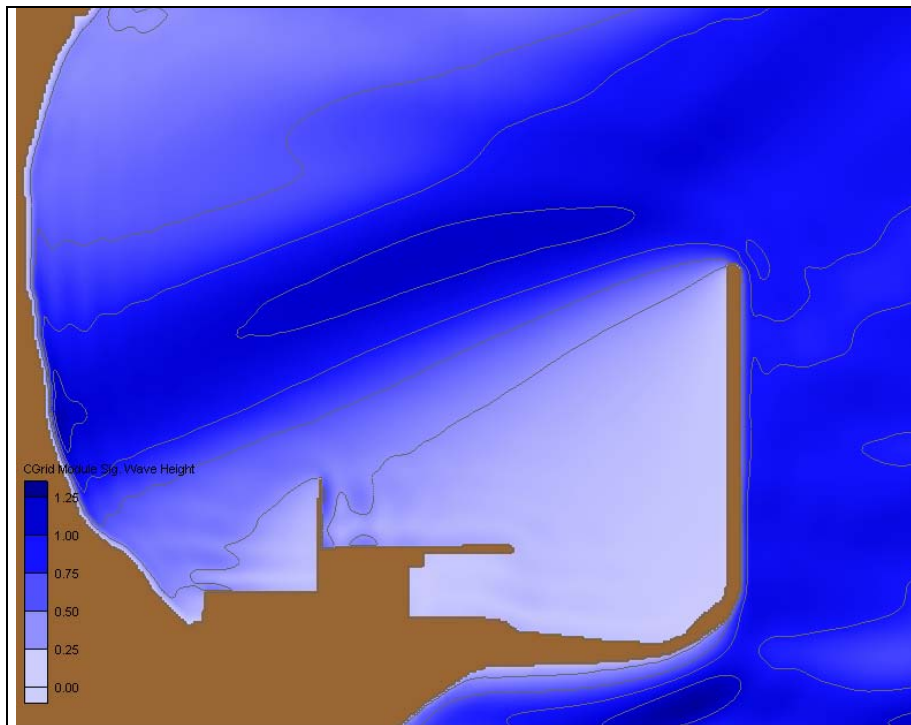


Figura A-V.10. Escenarios extremos – Swell ENE



Figura A-V.11. Escenarios extremos – Swell E



Figura A-V.12. Escenarios extremos – Swell ESE

