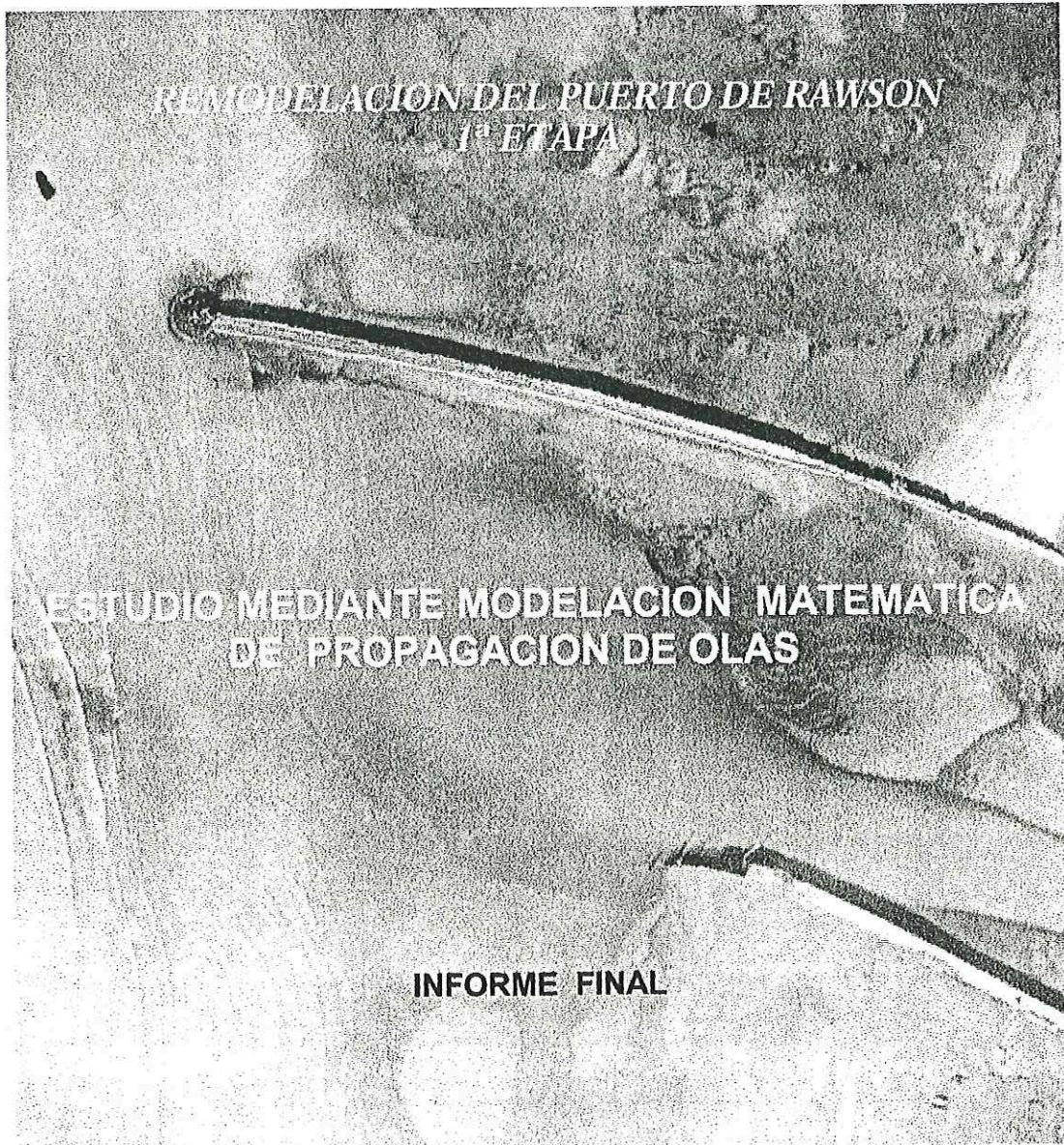


MINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA Y VIVIENDA  
SECRETARIA DE OBRAS PUBLICAS  
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS

INSTITUTO NACIONAL  
DEL AGUA Y DEL AMBIENTE

LABORATORIO DE HIDRAULICA  
Y DEL AMBIENTE



Octubre, 2000  
Informe LHA 19-01-00

LABORATORIO DE HIDRAULICA Y DEL AMBIENTE

**INA  
LABORATORIO DE HIDRAULICA Y DEL AMBIENTE**

**DIRECTOR**

*Ing. J.C. De Lio*

---

**Informe producido por**

*Ing. R. Castellano  
Lic. P. Tarela*

**Equipo de trabajo**

*Ing. R. Castellano  
Lic. P. Tarela  
Dr. A.N. Menendez  
Sr. C.A. Haspert*

**Areas de Apoyo**

*Adquisición de datos y computación*

*Sr. J. Torchio*

# INDICE DE MATERIAS

<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>2. DESCRIPCION FISICA DE LA REGION</b>	<b>2</b>
Información batimétrica	2
Planos de referencia	2
Morfología costera	2
Nivel del mar	3
Clima de olas	3
<b>3. DESCRIPCION DE LAS OBRAS</b>	<b>5</b>
<b>4. MODELO DE REFRACCION DE OLAS</b>	<b>6</b>
4.1. Hipótesis básicas	6
4.2. Implementación	6
4.3. Escenarios	7
4.4. Resultados	9
Corridas preliminares	9
Corridas definitivas	10
4.4.2. Condiciones de borde para la modelación matemática interior	12
4.4.3. Modelo físico 3D	13
<b>5. MODELO MATEMATICO DE PROPAGACION DE OLAS</b>	<b>14</b>
5.1 Metodología del estudio	14
5.2 Datos de base	14
5.2.1 Planimetría y cartas náuticas	14
5.2.2 Batimetría	15
5.2.3 Características de las olas incidentes	15
5.2.4 Características reflexivas de los contornos físicos del puerto	16
5.2.5 Determinación de escenarios de clima de olas	17
5.3.1 Redes de elementos finitos	17
5.3.2 Contornos del dominio de cálculo	18
5.3.3 Representación del espectro de olas incidentes	19
5.4. RESULTADOS	20
5.4.1 Altura significativa en el área portuaria	20
Proyecto Preliminar 1	20
Proyecto Preliminar 3	21
Proyecto Preliminar 4	21
5.4.2 Altura significativa en estaciones de seguimiento	22
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>25</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>27</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Ubicación del área de estudio
Figura 2	Proyecto Preliminar 1
Figura 3	Proyecto Preliminar 3
Figura 4	Proyecto Preliminar 4
Figura 5	Grillas de cálculo de refracción de olas
Figura 6	Grilla 3
Figura 7	Refracción de olas en grilla 3
Figura 8	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 1 - Escenario 2
Figura 9	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 1 - Escenario 7
Figura 10	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 1 - Escenario 8
Figura 11	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 3 - Escenario 2
Figura 12	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 3 - Escenario 7
Figura 13	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 3 - Escenario 8
Figura 14	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 4 - Escenario 2
Figura 15	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 4 - Escenario 7
Figura 16	Envolventes de altura de ola - Proyecto Preliminar 4 - Escenario 8
Figura 17	Comparación de altura de ola en estaciones - Escenario 2
Figura 18	Comparación de altura de ola en estaciones - Escenario 2
Figura 19	Comparación de altura de ola en estaciones - Escenario 7
Figura 20	Comparación de altura de ola en estaciones - Escenario 7
Figura 21	Comparación de altura de ola en estaciones - Escenario 8
Figura 22	Comparación de altura de ola en estaciones - Escenario 8

## INDICE DE FOTOGRAFIAS

Foto 1 Bahía Engaño y Restinga Sur

Foto 2 Restinga Sur

Foto 3 Vista panorámica del puerto de Rawson, playas norte y sur

Foto 4 Vista general de la escollera sur, desde la playa sur

Foto 5 Reflexión de olas sobre la escollera sur, en el interior del puerto (aguas bajas)

Foto 6 Detalle de bloques Akmon de la escollera sur caídos sobre la playa sur

Foto 7 Vista general de la escollera norte

Foto 8 Vista de la playa al norte de la escollera norte actual

## **ESTUDIO MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA DE PROPAGACION DE OLAS**

### **INFORME FINAL**

#### **1. INTRODUCCION**

La Provincia de Chubut ha licitado un proyecto de ampliación de las instalaciones (*Remodelación del Puerto de Rawson – 1ª Etapa*) que comprende, en una primera fase de obras, la prolongación de la escollera Sur existente y la construcción de una nueva escollera al norte de la desembocadura del río.

A requerimiento de la empresa **DRAGADOS Y OBRAS PORTUARIAS S.A. (DYOPSA)**, adjudicataria de las obras, el **LABORATORIO DE HIDRAULICA Y DEL AMBIENTE (LHA)**, dependiente del **INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA Y DEL AMBIENTE (INA)**, ha realizado los estudios mediante modelación matemática de la propagación de olas, a los efectos de caracterizar la ola de diseño de las obras de abrigo como también de evaluar la capacidad de protección que las obras proveen al interior del puerto, de las que se estudiaron distintas configuraciones.

Los estudios efectuados, que se detallan en este Informe, responden a una oferta elaborada por el LHA el de mayo de 2000, y aceptada por DYOPSA mediante Orden de Compra 3230/00 del 30/05/00.

## **2. DESCRIPCION FISICA DE LA REGION**

El puerto de Rawson, Provincia de Chubut, se halla ubicado en la desembocadura del río homónimo en el océano Atlántico, en las coordenadas geográficas 43° 20' de latitud Sur y 65° 02' de longitud Oeste (Figura 1).

La información de base utilizada en el presente estudio se refiere a batimetrías y clima de olas, como también el régimen de mareas

### **Información batimétrica**

Se utilizaron las siguientes Cartas Náuticas Publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (SHN):

Carta H 215 De Faro Punta Norte a Faro San José. Escala 1:275000

Carta N° 58 De Punta Ninfas a Isla Tova. Escala 1: 300.000

Carta N° 68 Río Chubut y Proximidades Escala 1:25.000

A ello se agregó un relevamiento de detalle realizado por DYOPSA en 1999 y que abarcó la región costera en el entorno de las obras, incluyendo la desembocadura del río Chubut.

### **Planos de referencia**

El plano de referencia de la información mareológica y batimétrica publicada por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) es el límite inferior de la media de bajamares de sicigias.

Las cotas del proyecto y el relevamiento de DYOPSA están referidos al cero del Riachuelo (cero MOP), que se halla ubicado 1,63 m por encima del cero SHN.

### **Morfología costera**

El puerto de Rawson se halla ubicado en la Bahía Engaño, en un emplazamiento relativamente protegido en lo que a acción del oleaje se refiere. Hacia el Norte, la costa se presenta levemente cóncava, y su orientación general es francamente rectilínea a lo largo de 135 Km hasta Punta Delgada en la Península de Valdés con una dirección de unos 65° respecto del Norte geográfico (aproximadamente WSW a ENE), interrumpida únicamente por la entrada al Golfo Nuevo.

Hacia el Sur la orientación de la costa es de 160° respecto del norte (aproximadamente de NNW a SSE) por unos 4 Km para luego cambiar gradualmente su orientación a unos 220° (aproximadamente NE a SW).

De esta manera, la exposición al oleaje del emplazamiento resulta limitada a un sector con un desarrollo de algo menos de 90°, desde el ENE al SSE.

Inmediatamente al Sur de la desembocadura del río Chubut, un extenso sistema de restingas (Foto 1) agrega protección de las olas que proceden del SE y SSE. La restinga es una plataforma rocosa de desarrollo aproximadamente horizontal, y de cota tal que resulta cubierta por las mareas altas e impone una fuerte limitación a la propagación de olas, debido a la escasa profundidad. Su ancho es variable, alcanzando hasta unos 750 m desde la playa.

## Nivel del mar

El régimen de mareas en la región es semidiurno, siendo el nivel medio de +2.50 m respecto del plano de referencia SHN.

En la tabla siguiente tomada de valores publicados por el SHN, se indican los niveles de marea astronómica.

**Tabla 2.1 - Marea Astronómica en el Puerto de Rawson**

Alturas en metros sobre el plano de reducción					Amplitudes	
Marea	Pleamares		Bajamares			
	Sicigias	Cuadraturas	Sicigias	Cuadraturas	Sicigias	Cuadraturas
Equinociales de Perigeo	4.48	3.33	0.52	1.67	3.96	1.66
De Perigeo	4.40	3.40	0.60	1.60	3.80	1.80
Medias	4.17	3.64	0.83	1.36	3.34	2.28

A la marea astronómica se suma, en el caso de temporales, la acción meteorológica, la que se ha estimado (Ref. 1) en 1.05 m con una recurrencia de 50 años.

Para el presente estudio se adoptó como máximo nivel del mar en 50 años el correspondiente a la pleamar de Sicigias Equinociales de Perigeo, (4.48 m) más 1.05 m de acción meteorológica. Referido al cero MOP, esto resulta en un nivel máximo del mar de +3,90 m.

## Clima de olas

A los efectos de disponer de una descripción del clima de olas se utilizó un análisis efectuado por OCEANOR (Ref. 2), a partir del Archivo Global de Parámetros de Ola de la UK Meteorological Office, generados mediante el Modelo Global de Olas, y calibrados mediante mediciones altimétricas de los satélites GEOSAT(1986/89) y TOPEX/POSEIDON (1992/98).

Para el análisis efectuado por OCEANOR se utilizaron datos correspondientes a dos nodos del Modelo Global de Olas, ubicados en las siguientes posiciones:

44.25° S, 64.69°W	15/10/86 al 12/06/91
43.69°S, 64.38°W	13/06/91 al 31/10/96

Ambos puntos están ubicados hacia el cuadrante SE del puerto de Rawson. Tal ubicación se eligió, de entre las disponibles, por dos motivos:

- Corresponde a una localización de aguas relativamente profundas, donde la batimetría local es muy suave (profundidad alrededor de 80 m de acuerdo a carta náutica H-215)
- Define una dirección con el puerto aproximadamente coincidente con la de propagación de las olas más frecuentes.

Como conclusión general del análisis de OCEANOR, surgió que la altura significativa media mensual es muy uniforme a lo largo del año. Los temporales son más frecuentes en invierno, de abril a agosto. La máxima ola registrada fue de 7 m en 1995.

Las olas más frecuentes (56%) presentan una altura significativa  $H_s$  de 1 a 2 m y están asociadas a un período medio  $T_m$  de 5 a 6 s. El período de pico espectral  $T_p$  de estas olas es de 6 a 8 s.

En mar abierto la dirección mas frecuente de procedencia de las olas y por otra parte de mayor intensidad, es del sector comprendido entre S (26%) y SE (15%), disminuyendo la frecuencia porcentual hacia el N, al igual que amplitud de las olas.

Los temporales más intensos presentan altura significativas  $H_s$  de 5 a 6 m (13 casos en 10 años) y un período de pico asociado comprendido entre 11 y 17 segundos.

Las olas más altas que proceden del cuadrante NE se asocian a períodos de 7 a 12 s.

La presencia de swell (olas que se propagan fuera de su área de generación) es característica en la región, con amplitudes más frecuentes de 0.5 a 1.5 m y períodos de pico  $T_p$  de 6 a 7 s como valores más frecuentes, pero no son inusuales periodos de 10 a 15 s (15%) y aún mayores.

La estadística de valores extremos de alturas de ola  $H_{mo}$  para recurrencias de 1 a 100 años que resultan del análisis efectuado por OCEANOR se presenta en la tabla 2.2. En esta tabla,  $H_{mo}$  es la altura de ola determinada a partir de la integración de la función espectral  $S(f)$  (densidad de energía) y es una estimación de la altura significativa  $H_s$ , válida en aguas profundas o intermedias.

**Tabla 2.2 – Estadística de valores extremos de  $H_{mo}$  (OCEANOR)**

Periodo de Retorno→ Intervalo de clase ↓	Frecuencia (%)	1 año	5 años	10 años	50 años	100 años
Todas las direcciones	100	5.2	6.1	6.6	7.1	7.4
45-75°	10	3.6	4.3	4.8	5.2	5.6
75-105°	12	4.2	4.9	5.4	5.8	6.1
105-135°	12	3.7	4.7	5.5	6.2	6.5
135-165°	18	4.4	5.3	6.1	7.0	7.2
165-195°	26	5.2	6.1	6.6	7.1	7.4

### **3. DESCRIPCION DE LAS OBRAS**

Las nuevas obras de abrigo consisten en la prolongación de la escollera Sur en una extensión de 300 m y en la construcción de una nueva escollera al norte de la desembocadura, de unos 600 m de longitud.

En la actualidad un muelle pesquero se ubica sobre la margen izquierda del río. Las obras proyectadas prevén la construcción de un nuevo muelle y el dragado de un canal de acceso al mismo a cota  $-3.50$  m (MOP) con un ancho de unos 80 m. Aguas arriba del nuevo muelle, el canal de acceso hasta el muelle existente tendrá una profundidad de  $-1.50$  m.

Se acordó realizar los siguientes estudios:

- Propagación de olas desde aguas profundas hasta la entrada al puerto y el pie de las obras de abrigo
- Propagación de olas dentro del puerto para distintas configuraciones de la planta portuaria.

En lo referente a agitación interior del puerto, se analizaron diversas configuraciones de planta portuaria, que se denominarán Proyecto Preliminar 1, 3 y 4 (Figuras 2 a 4).

## 4. MODELO DE REFRACCION DE OLAS

El modelo de refracción de olas es una herramienta adecuada para resolver la propagación de olas en regiones extensas, donde los procesos físicos dominantes permiten despreciar el efecto de la reflexión y la difracción de las olas.

A partir de la caracterización del clima de olas definida en el Capítulo 3, definida en aguas profundas, el modelo matemático fue utilizado para trasladar esta información hasta las proximidades de las obras.

La modelación fue utilizada específicamente para los siguientes propósitos:

- Determinar la altura de ola a lo largo de las escolleras (talud exterior) a los efectos de definir condiciones de diseño para las mismas.
- establecer condiciones de borde de la modelación matemática que incluyó el interior del puerto
- Definir las condiciones de borde en los ensayos en modelo físico tridimensional.

### 4.1. Hipótesis básicas

Se considera una onda caracterizada por su periodo  $T$ , su longitud  $L$  (separación entre dos crestas sucesivas) y la celeridad  $C$ . Estas últimas dependen de la profundidad  $d$  en la que se propaga la onda. Si la celeridad de la onda es distinta en distintos puntos a lo largo de la cresta, ésta se deforma. Se denomina rayo a la trayectoria que describe un punto ubicado sobre la cresta de la onda, y que avanza con celeridad  $C$  perpendicularmente a la orientación local de la cresta de la ola. El modelo matemático de rayos permite el cómputo de la trayectoria de estos puntos y la altura de ola a lo largo de esa trayectoria. La hipótesis básica para plantear el modelo de propagación es que la energía de la ola se mantiene constante entre dos rayos.

Una descripción completa del modelo utilizado, de las hipótesis de base y de las técnicas de resolución utilizadas se da en la Ref. 3.

Dada la importancia de la limitación a la llegada de olas de algunas direcciones que impone la restinga debido a la escasa profundidad que genera condiciones de rotura de ola, se incorporó una condición de rotura dada por el criterio de Miche:

$$H_b = 0,4 L_o \tanh \left( \frac{2 \pi d}{L_o} \right)$$

donde  $H_b$  es la altura de ola rompiente,  $L_o$  la longitud de onda y  $d$  la profundidad local

### 4.2. Implementación

El cálculo se realiza sobre una región rectangular en la que se dispone de la información batimétrica en posiciones o nodos equidistantes.

Para ello se define un sistema cartesiano de coordenadas X, Y, en el que cada nodo resulta separado de otros por una distancia  $\Delta x$  y  $\Delta y$ , conformando una grilla de cálculo. La profundidad correspondiente a cada nodo de la grilla se obtuvo de las cartas náuticas y relevamientos batimétricos indicados en el Capítulo 2.

El cálculo se efectúa a partir de un borde de la región, en el que se conocen las condiciones iniciales: altura de ola H y la dirección de propagación  $\theta$ , definida ésta a partir del eje +X, en sentido antihorario.

Dada la extensión de la región de estudio, el cálculo se efectuó en tres regiones anidadas, cada una con menor extensión y menor separación entre nodos, de manera de asegurar una adecuada resolución en el entorno de las obras, donde además la conformación del lecho marino es más compleja y requiere de más densidad de información.

La primera grilla de cálculo representó una región de 77 Km x 110 Km, con el eje +Y orientado hacia el NW y el eje +X hacia el NE. Las profundidades en los nodos se basaron en la Carta N° 58 del SHN. La separación entre nodos fue  $\Delta x = \Delta y = 1250$  m.

La segunda grilla consistió en una región de 10050 m x 7050 m (67 x 47 nodos) con el eje +Y orientado hacia el W y el eje +X hacia el N. La separación entre nodos fue  $\Delta x = \Delta y = 150$  m y las profundidades en los nodos fueron obtenidas a partir de la Carta 68 del SHN.

Una tercera grilla de 3100 m x 2000 m (105 x 100 nodos) con  $\Delta x = \Delta y = 20$  m permitió estudiar la propagación de las olas en el entorno de las obras con adecuada resolución. El eje +Y estuvo dirigido al N y el eje +X hacia el E. Este último sistema está referido al sistema Gauss-Kruger y le corresponden las coordenadas de origen  $X_0 = 3577000$ ,  $Y_0 = 5200000$ .

En la Figura 5 se muestra la posición y dimensiones relativas entre la grilla 1 y la 2 y las líneas batimétricas que describen la conformación del lecho marino. En la Figura 6 se muestra la grilla 3 y uno de los contornos considerados para la modelación matemática del interior del puerto.

El cálculo se inició en el borde exterior de la grilla 1, donde se conocen la altura de ola y dirección de propagación. En cada caso se propagaron grupos de 10 rayos simultáneamente, con separaciones del orden de 1 a 10 m. El paso de tiempo para el cálculo de sucesivos puntos de un rayo fue del orden de los 5 a 8 segundos en la grilla 1 y de 0.5 a 1 segundo en la grilla 3. Cada rayo estuvo compuesto de aproximadamente 1000 puntos.

### 4.3. Escenarios

En primera instancia se efectuó una evaluación preliminar de altura de ola en el entorno de ambas escolleras para los siguientes escenarios, y NM +3.90:

**Tabla 4.1 – Escenarios de cálculo para la Escollera Sur**

Caso	Dir	Ho	T
S1	E	5.8	10
S2	E	5.8	13
S3	ESE	6.2	13
S4	ESE	6.2	16
S5	SE	6.6	7
S6	SE	6.6	10
S7	SE	6.6	13
S8	SE	6.6	16

**Tabla 4.2 – Escenarios de cálculo para la Escollera Norte**

Caso	Dir	Ho	T
N1	E	5.8	10
N2	E	5.8	13
N3	ENE	5.20	7
N4	ENE	5.2	10
N5	SE	6.6	7
N6	SE	6.6	10
N7	SE	6.6	13
N8	SE	6.6	16

A partir de los resultados computados para los escenarios de las tablas 4.1 y 4.2 (Ver 4.4. *Resultados – Corridas Preliminares*) se seleccionó un número más restringido de situaciones para un análisis más detallado como también para llevar a cabo la modelación matemática de agitación dentro del puerto. A ello se agregaron otros niveles del mar (+1 m y -1 m) para el análisis del comportamiento del pie de la coraza mediante la modelación física bidimensional.

En la tabla 4.3 se da un listado de las 9 situaciones definitivas para las que se realizaron cálculos de refracción de olas. En todos los casos se adoptó la altura de ola en aguas profundas correspondiente a una recurrencia de 50 años que surgen de la tabla 2.2, cuyo origen es el análisis realizado por OCEANOR.

**Tabla 4.3 – Escenarios de cálculo de refracción de olas**

Escenario	Dir	NM	Hs	T
1	SE	+3.9	6.6	16
2	SE	+1.0	6.6	16
3	SE	-1.0	6.6	16
4	ENE	+3.9	5.2	10
5	ENE	+1.0	5.2	10
6	ENE	-1.0	5.2	10
7	ENE	+3.9	5.2	7
8	NE	+3.9	4.8	7
9	NE	+1.0	4.8	7
10	NE	-1.0	4.8	7

Para los escenarios 9 y 10 sólo se efectuaron los cálculos que permitieron definir alturas de ola en el borde del modelo físico tridimensional, y que se han incorporado en la tabla 4.11.

#### 4.4. Resultados

Los cálculos de refracción han sido realizados para ondas monocromáticas, habiéndose considerado que la altura de ola en aguas profundas  $H_o$  representa la altura significativa de una distribución espectral.

En aguas de poca profundidad, donde además es posible la aparición de fenómenos de rotura de ola, se adoptó la metodología propuesta por Goda (Ref. 4) determinar la altura de ola significativa  $H_s$  al pie de las escolleras:

$$H_s = K_s H'_o \quad (h/L_o) \geq 0.2$$

$$H_s = \min \{ (\beta_o^* H'_o + \beta_1 h), \beta_{max} H'_o, 1.8 K_s H'_o \} \quad (h/L_o) \leq 0.2$$

donde  $K_s$  es el coeficiente de bajío (shoaling),  $H'_o = H / K_s$ ,  $\beta_o$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_{max}$  son funciones de la pendiente del lecho marino  $\theta$  y de la pendiente de la ola  $H'_o/L_o$ .  $L_o$  es la longitud de onda en aguas profundas y  $h$  la profundidad local donde se estima  $H_s$ . La función  $\min\{ \}$  indica el valor mínimo de los parámetros entre llaves.

Los ángulos corresponden a la dirección de procedencia de las olas, y se miden respecto del eje +X (orientado hacia el E) en sentido antihorario.

#### Corridas preliminares

En las tablas 4.4 y 4.5 se presentan los resultados de altura de ola en el área de los morros de las escolleras y entrada al puerto (ubicación correspondiente al Proyecto Preliminar 1)

**Tabla 4.4 - Escollera Norte – Altura de ola en las proximidades del morro**

Escenario	Dir	T (°)	Ho (m)	H morro (m)
N1	ENE	7	5.2	3.40
N2	ENE	10	5.2	4.45
N3	E	10	5.8	3.90
N4	E	13	5.8	2.50
N5	SE	7	6.6	4.30
N6	SE	10	6.6	3.15
N7	SE	13	6.6	4.10
N8	SE	16	6.6	4.55

**Tabla 4.5 - Escollera Sur – Alturas de ola en las proximidades del morro**

Escenario	Dir	T (°)	Ho (m)	H morro (m)
S1	E	10	5.8	4.00
S2	E	13	5.8	2.30
S3	ESE	13	6.2	4.50
S4	ESE	16	6.2	4.40
S5	SE	7	6.6	4.35
S6	SE	10	6.6	4.45
S7	SE	13	6.6	4.40
S8	SE	16	6.6	4.80

### Corridas definitivas

De las tablas 4.4 y 4.5 surge que para  $NM = +3.90$ , los escenarios N2 y S8, generan la sollicitación más importante que actúa sobre los morros de las escolleras Norte y Sur, como así también las condiciones más desfavorables para la agitación en el interior del puerto. Consecuentemente, éstas fueron situaciones para las que se efectuó un cómputo detallado de las alturas de ola a lo largo de ambas escolleras. Para las direcciones y períodos correspondientes a estos escenarios, se incorporaron además dos nuevos niveles del mar para la realización de las corridas definitivas.

Para la escollera Sur los escenarios de cálculo finales (tabla 4.4, Escenarios 1 a 3) fueron para olas de 6,60 m,  $T = 16$  s y  $NM = +3,90$ ,  $+1.0$  m y  $-1.0$  m. En la Figura 7 se muestra la trayectoria de rayos en la grilla 3 para  $NM = +3.90$ .

Para la escollera Norte se calcularon distribuciones de altura de ola a lo largo de la traza para direcciones de incidencia del ENE (Escenarios 4 a 7) y del NE (Escenario 8), con períodos de 10 y 7 segundos en el primer caso y de 7 segundos en el último.

**Tabla 4.6** Escollera Sur - Dir SE -  $H_o = 6,60 \text{ m}$  -  $T = 16 \text{ s}$

Cota.T.N. (m)	NM = +3,90 m			NM = + 1m			NM = - 1m		
	Prof. (m)	Hs (m)	Dir (°)	Prof.	Hs (m)	Dir (°)	Prof.(m)	Hs(m)	Dir (°)
-2.0	5.9	3.85	155	3.0	2.00	205	1.00	0.40	200
-2.5	6.4	4.15	155	3.5	2.30	190	1.50	1.05	190
-2.8	6.7	4.30	163	3.8	2.50	173	1.80	1.25	178
-3.0	6.9	4.50	165	4.0	2.65	172	1.95	1.40	173
-3.5	7.4	4.80	158	4.5	2.95	160	2.10	1.70	168

**Tabla 4.7** Escollera Norte - Dir ENE -  $H_o = 5.2 \text{ m}$  -  $T = 10 \text{ s}$

Cota T.N. (m)	NM = +3,90 m			NM = + 1m			NM = - 1m		
	Prof. (m)	Hs (m)	Dir	Prof.(m)	Hs (m)	Dir (°)	Prof.(m)	Hs (m)	Dir (°)
1	2.90	2.00	179	0	0	-	0	0	-
0	3.90	2.55	178	1.00	0.65	178	0	0	-
-1.5	5.40	3.40	177	2.50	1.65	175	0.50	0.36	178
-2	6.40	4.00	177	3.00	1.95	174	1.00	0.70	177
-2.5	6.40	4.00	176	3.50	2.25	173	1.50	1.00	170
-3.0	6.90	4.30	177	4.00	2.50	172	2.00	1.35	165
-3.3	7.20	4.50	177	4.30	2.70	172	2.30	1.55	165
-3.5	7.40	4.60	177	4.50	2.80	172	2.50	1.65	165

**Tabla 4.8** Escollera Norte Dir ENE  
 $H_o = 5.2 \text{ m}$  -  $T = 7 \text{ s}$

Cota T.N. (m)	NM = +3,90 m		
	Prof. (m)	Hs (m)	Dir
1	2.90	1.85	186
0	3.90	2.40	187
-1.5	5.40	3.30	187
-2	6.40	3.4	187
-2.5	6.40	3.0	186
-3.0	6.90	3.50	186
-3.3	7.20	3.43	186
-3.5	7.40	3.55	187

**Tabla 4.9 - Escollera Norte Dir NE**  
 $H_o = 4.80 - T = 7 \text{ s}$

	NM = +3,90 m		
	Prof. (m)	Hs (m)	Dir
1	2.90	1.90	189
0	3.90	2.50	190
-1.5	5.40	3.30	190
-2	6.40	3.90	190
-2.5	6.40	3.90	190
-3.0	6.90	4.15	190
-3.3	7.20	4.35	191
-3.5	7.40	4.45	192

Puede inferirse de las tablas precedentes que la refracción produce el giro de la dirección de propagación de las olas, las que tienden a llegar desde una dirección E / ESE al punto de emplazamiento aún cuando en aguas profundas proceden inclusive de la dirección ENE. Esto es así particularmente para los periodos más largos estudiados. En particular para  $T = 10$  segundos, las olas del ENE en aguas profundas llegan al lugar del emplazamiento con dirección levemente del ESE (ángulos menores que  $180^\circ$ ).

La restinga ubicada hacia el sur del emplazamiento brinda protección a las olas procedentes del ESE / SE, dada su cota relativamente elevada que favorece la rotura de las olas, condicionando de esta manera la máxima ola posible al pie de las obras.

La solicitud más importante para los morros de ambas escolleras proviene de los temporales del SE con olas de 4.80 m.

El tronco de la escollera Norte se halla expuesto especialmente a las olas del NE / ENE de periodos más cortos (7 s) y los niveles del mar más altos, razón por la cual los efectos de refracción disminuyen, permitiendo una incidencia relativamente más frontal a la estructura. Si embargo estas situaciones presentan al mismo tiempo alturas de ola menor, dada la protección que ofrece la costa debido a su alineación.

Para otras situaciones (periodos mayores, dirección del ENE al SE) dada la orientación de la traza de la escollera Norte, la incidencia de las olas es fuertemente oblicua.

#### 4.4.2. Condiciones de borde para la modelación matemática interior

Las alturas de ola que constituyen los datos de borde de la modelación matemática de la propagación de olas dentro del área portuaria, fueron obtenidas de los cálculos de refracción realizados, y corresponden un segmento de recta ( $X=\text{constante}$ ) ubicado aproximadamente en la isobata  $-5 \text{ m}$ , frente a los morros de las escolleras.

**Tabla 4.10 – Condiciones de borde para la modelación matemática**

Escenario	Aguas Profundas			Borde Modelo Matemático	
	Dir	Ho (m)	T (s)	H (m)	Dir (°)
2	SE	6.6	16	6.0	330
7	NE	4.8	7	4.45	10
8	ENE	5.2	10	4.20	0

La tabla 4.10 muestra los valores de H en el borde del área modelada para el cómputo de agitación dentro del puerto. Las direcciones de procedencia de las olas están referidas al eje +X (dirigido al E), y se miden en sentido antihorario.

#### 4.4.3. Modelo físico 3D

A los efectos de proveer de la información de base para la modelación física tridimensional (realizada en el DANISH HYDRAULIC INSTITUTE) se confeccionó la tabla 4.11, en la que se

**Tabla 4.11 – Condiciones de borde para el modelo físico tridimensional**

ESCENARIO	DESCRIPCION			VALORES DE H EN ISOBATA -6 m														
				DIR	Recurrencia (años)													
					1		5		10		25		50		100			
					Ho	H	Ho	H	Ho	H	Ho	H	Ho	H	Ho	H		
1	SE	16	3.9	146	4.05	3.07	5.00	3.79	5.80	4.39	6.25	4.73	6.60	5.00	6.85	5.19		
2	ENE	10	3.9	175	3.60	3.05	4.30	3.64	4.80	4.06	5.10	4.32	5.20	4.40	5.60	4.74		
3	SE	16	1	152	4.05	2.33	5.00	2.88	5.80	3.34	6.25	3.60	6.60	3.80	6.85	3.94		
4	ENE	10	1	169	3.60	2.08	4.30	2.48	4.80	2.77	5.10	2.94	5.20	3.00	5.60	3.23		
5	SE	16	-1	160	4.05	1.84	5.00	2.27	5.80	2.64	6.25	2.84	6.60	3.00	6.85	3.11		
6	ENE	10	-1	162	3.60	1.94	4.30	2.32	4.80	2.58	5.10	2.75	5.20	2.80	5.60	3.02		
7	NE	7	1	180	3.23	1.35	3.90	1.63	4.30	1.79	4.60	1.92	4.80	2.00	5.15	2.15		
8	NE	7	-1	175	3.23	0.54	3.90	0.65	4.30	0.72	4.60	0.77	4.80	0.80	5.15	0.86		
9	NE	7	3.9	192	3.23	3.36	3.90	4.06	4.30	4.48	4.60	4.79	4.80	5.00	5.15	5.36		

indica la altura de ola calculada para una posición frente a los extremos de las escolleras y entrada al puerto, ubicada en la isobata - 6 m, correspondiente a la ubicación de los generadores de ola en el modelo físico.

Los valores de altura de ola en aguas profundas  $H_o$  son los determinados en el estudio efectuado por OCEANOR. Dados los intervalos de clase utilizados por OCEANOR para clasificar las direcciones de procedencia de las olas (tabla 2.2) algunos valores debieron ser interpolados para ajustarlos al sistema de clasificación de direcciones utilizados en el presente análisis.

## **5. MODELO MATEMATICO DE PROPAGACION DE OLAS**

### **5.1 Metodología del estudio**

Para analizar la agitación en el recinto portuario, bajo la influencia de las olas que penetran por su boca, se utilizaron técnicas de simulación numérica.

La simulación numérica de la agitación en un recinto portuario requiere de un modelo matemático relativamente sofisticado y computacionalmente costoso, que debe contemplar los mecanismos dominantes de transformación de las olas: la difracción, la reflexión y la refracción. De ellas, la última juega un rol secundario debido a la topografía relativamente plana del fondo, a excepción de las zonas de los canales de navegación. Esto conduce a un problema diferencial de tipo elíptico, es decir, produce un acoplamiento de la solución en todo el dominio y, en consecuencia, a la necesidad de resolver grandes sistemas de ecuaciones algebraicas.

El modelo matemático básico de agitación en recintos portuarios fue desarrollado por Berkhoff. Combinando su "ecuación para los taludes suaves" con apropiadas condiciones de borde, es posible simular adecuadamente cualquier problema práctico, una vez definida la ola incidente.

La solución del problema matemático planteado se encara, en general, por el método de los elementos finitos, especialmente apto para problemas diferenciales elípticos. La red de cálculo se genera de modo de, por un lado, ajustarse al contorno portuario y, por el otro, tener un paso suficientemente pequeño respecto de la longitud de onda de la ola más corta, de modo de representarla adecuadamente.

Como solución, el modelo de Berkhoff (Ref. 5) provee la distribución espacial de alturas de ola, que es el resultado de interés ingenieril y, eventualmente, el campo de direcciones de propagación.

El LHA dispone del programa *DIFRAC* (Ref. 6), que tiene implementada la metodología descripta. Más detalles técnicos de este tipo de modelo y una aplicación se presentan entre las referencias y en el Anexo I.

Ahora bien, el modelo de Berkhoff está planteado para un frente de ola monocromático y en una dirección definida. Sin embargo, en la práctica los frentes de olas generados por vientos se presentan con un espectro de frecuencias y/o uno de direcciones. El modelo de Berkhoff puede resolver estas situaciones apelando al principio de superposición, dado el carácter lineal de las ecuaciones.

En otras palabras, los espectros se discretizan y se efectúan los ensayos para todas las combinaciones de frecuencias y direcciones, obteniendo luego el resultado final mediante la suma de las soluciones particulares. Obviamente, esto hace crecer fuertemente el tiempo de cálculo necesario para simular un escenario.

### **5.2 Datos de base**

#### **5.2.1 Planimetría y cartas náuticas**

Se emplearon las detalladas en el Capítulo 2. En particular, se analizaron las configuraciones de planta portuaria indicadas en las Figuras 2 a 4, denominadas Proyecto Preliminar 1, 3 y 4 respectivamente.

### 5.2.2 Batimetría

Para la zona de estudio se emplearon los datos detalladas en el Capítulo 2.

Adicionalmente, para las distintas configuraciones portuarias estudiadas, se consideró que el canal de navegación tiene las siguientes características batimétricas:

**Tabla 5.1 – Canales de navegación (valores medios)**

Tramo	Ancho	Calado	Taludes
Boca puerto a nuevo muelle	40 m (boca) a 65 m (muelle)	- 3.50 m (MOP)	1:3
Comunicación entre muelle nuevo y actual	50 m (medio)	- 1.50 m (MOP)	1:3

### 5.2.3 Características de las olas incidentes

Se tomó como base el análisis producido por OCEANOR de Noruega (ver Capítulo 2 y Ref. 2)

Los valores informados de altura y período son sólo los parámetros representativos de lo que, más precisamente, es una distribución espectral, en frecuencia y dirección, de olas:

$$S(f, \theta) = S(f)G(\theta, f)$$

con  $S(f, \theta)$  la densidad de energía para la frecuencia  $f$  y la dirección  $\theta$

Para el espectro de frecuencia se utilizó la expresión de Bretschneider-Mitsuyasu (Ref. 7):

$$S(f) = A f^{-5} \exp(-B f^{-4})$$

donde

$$A = 0.257 H^2 T^{-4}$$

$$B = 1.03 T^{-4}$$

siendo  $H$  la altura significativa y  $T$  el período de la ola significativa.

Para el espectro de direcciones se aplicó la expresión de Mitsuyasu:

$$G(\theta, f) = \frac{1}{\pi} 2^{2s-1} \frac{\Gamma^2(s+1)}{\Gamma(2s+1)} \cos^{2s}\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

El parámetro  $s$  se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$s = s_{max} \left( \frac{f}{f_p} \right)^n$$

donde

$$n = \begin{cases} 5 & \text{si } f \leq f_p \\ -2,5 & \text{si } f > f_p \end{cases}$$

y para  $s_{max}$  Goda propone un valor de 10 para olas de vientos locales, 25 para swell con corta distancia de decaimiento y 75 para swell con gran distancia de decaimiento. en este estudio se utilizó un valor  $s_{max} = 15$ .

### 5.2.4 Características reflexivas de los contornos físicos del puerto

De acuerdo a la inspección realizada *in situ*, se determinaron las siguientes características reflexivas de los contornos físicos existentes a la fecha:

- a) La escollera sur es un contorno impermeables que, en consecuencia, actúa como reflejante frente a la incidencia de olas (foto 4). Su base está formada por una disposición regular de bloques que presentan un talud 1:1 aproximadamente (foto 5). Para condiciones de marea baja, la misma presenta un alto índice de reflexión (al menos 80%), tal como se aprecia en la foto 5. Para marea alta la base queda sumergida, y el grado de reflexión del oleaje incidente disminuye (entre 30 y 50%) en virtud de la forma más irregular que actualmente presenta el coronamiento (constituído por bloques Akmon, algunos desplazados e incluso una veintena caídos, ver foto 6).
- b) La escollera norte está formada por un tablestacado vertical de hormigón que se puede considerar totalmente reflejante tanto para marea baja como alta, provisto que el mismo no sea sobrepasado (foto 7). El mismo presenta una discontinuidad de alrededor de 60 m. Además, su extremo está roto, presentando tablestacas caídas y faltantes. Se consideró que la estructura era totalmente reflejante hasta la altura de la última losa actualmente en posición horizontal.
- c) La playa al norte de la escollera norte presenta un talud suave, que al pie de la escollera se estimó del orden del 3% (foto 8). En este borde parte de la energía mecánica incidente se disipa, esencialmente, debido a la rotura del oleaje. Por ello, a los efectos de la simulación del fenómeno, tal contorno se considera como parcialmente reflejante.
- d) Las márgenes del río Chubut en su tramo final de desembocadura presentan taludes medios de alrededor del 25% compuestos por material fino seguidos de un talud superior de canto rodado que llega al 100% .
- e) La boca actual del puerto es amplia, permitiendo la entrada directa de aquellos frentes de olas con dirección de propagación básicamente del E. Hacia el SE se presenta un área de restinga que produce rotura parcial de los frentes en condiciones de marea baja..

El proyecto de ampliación modifica algunos de estos contornos, a la vez que introduce nuevas estructuras. Los coeficientes de reflexión (absorción) empleados se detallan en la implementación del modelo (ver más abajo), ya que, además de los contornos físicos, para su determinación se deben tener en cuenta las características de las olas incidentes.

## 5.2.5 Determinación de escenarios de clima de olas

En base a la propagación de olas realizadas con el modelo de refracción, se determinó que la dirección principal de incidencia del oleaje generado por el viento, provenientes del océano, para los escenarios ensayados es la que figura en la tabla 5.2.

**Tabla 5.2 – Dirección y altura de olas para los escenarios ensayados.**  
<sup>1</sup> Grados medidos desde el E en sentido antihorario

Escenario	T (seg)	Aguas Profundas		Entrada al puerto	
		H (m)	Dirección	H (m)	Dirección <sub>1</sub>
2	16	6.6	SE	6.00	330
7	7	4.8	NE	4.45	10
8	10	5.2	ENE	4.20	0

El escenario 2 corresponden a las olas de diseño según los pliegos de licitación de las obras, con las alturas en aguas profundas correspondientes a la ola de 50 años de recurrencia.

## 5.3 Implementación del modelo

### 5.3.1 Redes de elementos finitos

Se generó una red de elementos finitos para cada configuración portuaria analizada. Cada una de ellas está circunscripta por los siguientes bordes:

- ♦ Al N: escollera norte proyectada, playa y escollera norte actual
- ♦ Al W: el río Chubut
- ♦ Al S: escollera sur ampliada
- ♦ Al E: una zona exterior al puerto que envuelve la boca de acceso

Los escollerados son límites físicos, coincidentes con el contorno interior al puerto de las respectivas escolleras. Nótese que cualquiera de las configuraciones contiene a la actual escollera norte dentro del futuro puerto, por lo que la misma se transforma en un contorno interno.

Una parte del límite W es también físico, y coincide con las márgenes del río Chubut. El extremo de dicho borde es matemático, y se lo fijó a través del curso del río Chubut a unos 400 m aguas arriba del muelle actual, posición considerada suficientemente alejada de la boca y de los puntos de interés.

En el caso del límite E, se definió una zona exterior a la boca del puerto de forma tal que su lado al E coincida con un borde matemático del modelo de refracción. De este modo, la información del modelo de refracción se puede incorporar directamente como condición de borde del modelo de agitación.

En este sentido, nótese que el segmento que conforma el borde E prácticamente constituye una isolínea de nivel, con valores de  $5 \text{ m} \pm 0.2 \text{ m}$  entre sus extremos en condiciones de marea media, minimizando de esta forma la refracción local. Por el otro, la forma envolvente de este borde permite visualizar el detalle de la difracción que producen los morros de las escolleras.

El espaciamiento medio entre nodos se tomó del orden de los 3 m, que resulta suficiente para representar las oscilaciones más significativas. De esta manera, resultaron la siguiente cantidad de elementos y nodos:

**Tabla 5.3 – Redes de elementos finitos.**

<b>Configuración</b>	<b>Elementos</b>	<b>Nodos</b>
PRELIMINAR 1	80090	40821
PRELIMINAR 3	85538	43484
PRELIMINAR 4	85109	43310

A cada elemento se le asignó la profundidad correspondiente, de acuerdo a la batimetría utilizada.

### 5.3.2 Contornos del dominio de cálculo

Para los escenarios de estudio, con un nivel del mar de + 3.90 m (MOP), se consideraron las siguientes características de absorción en los contornos del modelo:

**Tabla 5.4 – Coeficientes de absorción en los bordes del modelo.**

<b>Borde</b>	<b>Coefficiente de absorción</b>
Escollera norte	0.65
Playa norte (entre escollera norte proyectada y actual)	0.70
Extremo escollera norte actual que formaría un espigón interno	0.00
Muelle proyectado	0.65
Márgenes río Chubut	0.65
Extremo W a través del río Chubut	1.00
Escollera sur actual	0.90
Escollera sur proyectada	0.65
Envolvente borde E	1.00

Para la condición estudiada los escollerados nuevos quedan sólo parcialmente sumergidos, estimándose una absorción del 65%.

El tramo compuesto por la escollera sur actual presenta una cota de coronamiento variable, de acuerdo a la inspección *in situ* (ver fotos 4 y 6). DYOPSA informa una cota media de + 3.50 m (MOP), lo que la transforma en un rompeolas sumergido para la condición de nivel del mar bajo estudio. En tal situación, se estimó una absorción del 90 %.

En el caso en que el extremo de la actual escollera norte forme un espigón interno, delimitando la playa al norte del mismo, su estructura de tablestacado vertical impermeable lo constituye en un contorno totalmente reflejante, por lo cual se utilizó un coeficiente de absorción nulo.

Por su parte, el muelle proyectado sería sobre pilotes, con talud del terreno natural, considerándose un coeficiente de absorción del 65 %, el mismo que para las márgenes del río Chubut.

Respecto de los bordes matemáticos, el extremo E del dominio se comportará como un contorno transparente para las olas entrantes y de radiación para las olas salientes. El extremo W correspondiente al borde que cruza el río Chubut es un borde de radiación para las olas salientes.

### 5.3.3 Representación del espectro de olas incidentes

Según se mencionó, se adoptó como ola significativa la que tiene un período de retorno de 50 años, como indicadora de situaciones límite. Para cada escenario estudiado se construyó el espectro de frecuencia y direcciones, el cual fue discretizado adecuadamente.

Las direcciones especificadas en la tabla 5.2 se tomaron como representativas de la dirección principal de propagación utilizada en el proceso de discretización del espectro incidente. El mismo se truncó en 30° en forma simétrica respecto de la dirección principal de propagación, es decir, 15° a cada lado de ella. El proceso de discretización se realizó tomando 3 direcciones: la principal (informada en la tabla 5.2), y las dos restantes a  $\pm 10^\circ$  de la misma. De esta forma, cada dirección representa un barrido angular de 10° (con tal dirección centrado en el mismo).

Para la discretización en frecuencia se tomó el intervalo  $0.5f_p \leq f \leq 3f_p$ , con los pasos  $\Delta f$  mostrados en la tabla 5.5.

Tabla 5.5 – Discretización del espectro en frecuencias.

Escenarios	T (seg)	$f_p$ (Hz)	$\Delta f$ (Hz)	Rango (Hz)	
				$0.5f_p$	$3f_p$
2	16	0.0625	0.0130	0.03125	0.1875
7	7	0.1429	0.0298	0.07145	0.4287
8	10	0.1	0.0208	0.05	0.3

Truncando los intervalos con frecuencias fuera del rango mencionado, se obtuvieron 12 intervalos para representar el rango de frecuencias involucradas.

Nótese que, de la combinación de intervalos de frecuencia y dirección, resultan 36 corridas monocromáticas con el modelo para simular la ola de 50 años en cada escenario estudiado.

Resulta importante señalar que, debido al truncamiento en direcciones y frecuencias que se realiza sobre el espectro incidente, parte de la energía quedaría desechada. Para evitar este efecto se trabajó en forma conservativa, prorateando la energía perdida en el proceso de discretización a las componentes monocromáticas propagadas, de forma tal que:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) = \sum_j \sum_k S(f_j, \theta_k)$$

donde la integral representa la energía del espectro y la doble suma se extiende sobre todas las componentes monocromáticas en que se discretizó el espectro.

## **5.4. RESULTADOS**

Los resultados se presentan por una parte en forma gráfica, como líneas de isoamplitud de ola significativa en el área portuaria. También, para un conjunto de estaciones fijas dentro del área portuaria, en forma de coeficientes de atenuación porcentual, esto es la relación porcentual entre la altura en el punto considerado y la altura de ola de ola en la boca del puerto.

### **5.4.1 Altura significativa en el área portuaria**

En la boca del puerto, la altura de ola es menor para la configuración Preliminar 4 en el caso del escenario 2. Para los otros dos escenarios, en cambio, resulta ser la mayor.

Los patrones de altura máxima de ola en el interior del recinto portuario, para las distintas configuraciones y escenarios de clima de olas estudiados, son relativamente suaves. No obstante, en cada caso se observa una "lengua" definida por las envolventes de máximos de altura de ola que penetra desde la boca hacia el interior del recinto portuario.

En la situación extrema de aguas altas ensayada, la escollera sur actúa como un pantalla sumergida parcialmente reflejante. Cuando el ingreso de oleaje se produce desde el cuadrante NE, la reflexión de esta escollera tiende a incrementar la altura de ola en la zona del futuro muelle.

En general, la agitación más intensa se produce en la boca del puerto, y en los primeros 200 m del canal de navegación (aproximadamente, dado que su posición difiere para cada configuración). Luego, las "lenguas" definidas por las envolventes de máximos de altura de ola tienden a recostarse sobre la escollera sur, y presentan diferente grado de incidencia sobre la zona del futuro muelle (de acuerdo a lo descrito en el texto).

A continuación se presenta una descripción de los resultados por configuración.

#### **Proyecto Preliminar 1**

Las figuras 8, 9 y 10 presentan las curvas de isoamplitud máxima de ola para los escenarios 2 (E2), 7 (E7) y 8 (E8), respectivamente.

En el caso E2 se observa un patrón de difracción significativo en el morro sur, que, conjuntamente con la presencia del morro norte, produce un ingreso de energía de ola al recinto portuario en sentido E-W. Ambas escolleras absorben energía incidente. En el caso de la escollera sur, enfrentada a las olas que inciden desde la boca del puerto, la reflexión remante incrementa las alturas en sus adyacencias. En la escollera norte se observa una amplia zona por debajo de la altura 0.50 m, mientras que en el muelle proyectado las alturas están por debajo de 1.00 m.

En el caso E7, el frente ingresa en forma "directa" desde la boca del puerto hasta interceptar la escollera sur, por lo que se produce un incremento significativo de la altura de ola en la zona SE del interior del recinto. La reflexión parcial que tiene lugar en la escollera sur produce la penetración de olas de mayor amplitud en la desembocadura del río. Por el contrario, en la mitad N del interior portuario se observa una reducción de altura de ola respecto del caso

anterior (E2), observándose que esa región presenta alturas que no superan 1.00 m. En líneas generales, la zona del muelle aparece más calma, respecto de E2.

En el caso E8 se observa una similitud cualitativa con el caso anterior (E7), básicamente porque la dirección de ingreso de los frentes desde el exterior cambia poco y la amplitud a la entrada es similar. Sin embargo, como el efecto de difracción en el morro sur es pequeño, y la dirección de entrada es prácticamente paralela al extremo de la escollera sur, la reflexión constructiva decae y las alturas de ola en esa zona son algo menores a las del caso anterior. En esta situación, la difracción en el morro norte resulta de mayor envergadura que en E7, por lo que la mitad N del recinto presenta amplitudes superiores a dicho caso, aunque inferiores a E2.

En general, para todos los escenarios los patrones son relativamente suaves, con ausencia de zonas de resonancia, El caso E7 presenta la mayor concentración de energía por unidad de área del recinto, en la zona adyacente al nuevo tramo de la escollera sur y la boca de entrada.

### **Proyecto Preliminar 3**

Las figuras 11, 12 y 13 presentan las curvas de isoamplitud máxima de ola para los escenarios 2, 7 y 8, respectivamente.

En el caso E2 el conjunto de los morros en la boca del puerto produce la difracción del frente incidente en forma similar a la del mismo escenario pero en la configuración Preliminar 1. En este caso la línea de penetración máxima del frente se ha desplazado desde la coordenada local  $Y=650$  m (configuración Preliminar 1) hasta  $Y=750$  m, es decir, unos 100 m hacia el N. Este corrimiento es similar al del morro sur entre ambas configuraciones (unos 120 m). La altura de ola en el interior se reduce de forma tal que prácticamente todos los contornos presentan alturas adyacentes por debajo de 1.00 m. Una excepción la constituye el lado N del espigón que delimita la playa interna del recinto, donde las alturas están entre 1.50 y 2.00 m. La reflexión parcial en la escollera sur es poco significativa.

La penetración del patrón de olas en el escenario E7 resulta menos obstaculizado que en el caso anterior. Aunque la altura de ola a la entrada es menor que en el caso señalado en el párrafo anterior, en el interior la agitación es marcadamente superior, como se observa en la figura respectiva. La "lengua" de máximos de amplitud de ola sigue la línea del canal de navegación en las adyacencias de la boca del puerto, y luego se ecuesta hacia el SW hasta alcanzar la escollera sur en las coordenadas locales  $X=1800$  m,  $Y=600$  m, aproximadamente. La reflexión parcial en esta estructura produce que la lengua gire hacia la desembocadura del río, produciendo el aumento local de la amplitud en la zona del muelle.

En el caso E8 la situación resulta intermedia entre los dos casos anteriores, en lo que respecta a la distribución de líneas de isoamplitud. Sin embargo, las amplitudes en la zona central del recinto portuario son marcadamente menores que en el caso E7, aún cuando las amplitudes en la entrada resultan similares entre estos dos casos.

### **Proyecto Preliminar 4**

Las figuras 14, 15 y 16 presentan las curvas de isoamplitud máxima de ola para los escenarios 2, 7 y 8, respectivamente.

La modificación en la forma del escollero del puerto que introduce la configuración Preliminar 4 produce, en el caso E2, una reducción global de la amplitud máxima esperable en el interior del puerto, respecto del mismo escenario en la configuración Preliminar 3 (comparable desde el

punto de vista de la forma y posición de las escolleras). Justamente, para el caso E2 las olas de dirección 330 grados producen una agitación menor en la boca, a causa de la difracción y reflexión en los morros, respecto del caso comparativo mencionado, lo que implica que la energía efectivamente incidente al puerto resulta menor. En la cercanía de la boca, la lengua de máximos sigue la línea del canal de navegación, pero luego continúa con dirección E-W hacia el espigón que delimitará la playa interna.

El caso E7 también aparece como globalmente reducido respecto de la configuración Preliminar 3. La lengua de máximos, en la entrada definida sobre el canal de acceso, se recuesta hacia la escollera S, produciendo que la agitación en la zona de navegación más allá del espigón interno supere los 2.00 m. Sin embargo, en el muelle las alturas máximas esperables no superan 1.00 m.

Finalmente, y como en las configuraciones precedentes, el ensayo con el escenario E8 produce resultados intermedios entre los otros dos escenarios. En particular, la zona del muelle no supera 1.00 m de amplitud para esta situación.

#### 5.4.2 Altura significativa en estaciones de seguimiento

De acuerdo a lo solicitado por DYOPSA, se han analizado las amplitudes máximas de ola en ciertos puntos particulares para las distintas configuraciones y escenarios. El método de análisis consiste en definir una zona circular de 10 metros de radio y centro en el punto de interés, y obtener la altura representativa en el punto como promedio de los valores obtenidos con el modelo matemático dentro del disco. A continuación se presentan los coeficientes de atenuación K obtenidos, dados por la relación porcentual entre la altura de ola en el punto considerado y la altura de ola en aguas profundas  $H_0$ .

#### PRELIMINAR N°1

Estación	Descripción	Coordenadas		ESCENARIO		
		X(m)	Y(m)	2	7	8
				K (%)	K (%)	K (%)
1	Boca de acceso al puerto	3577297.6	5200625.7	0.79	0.76	0.68
2	Futuro muelle pesquero-punto1	3576627.6	5200834.0	0.13	0.13	0.14
3	Futuro muelle pesquero-punto2	3576557.3	5200870.7	0.07	0.09	0.09
4	Futuro muelle pesquero-punto3	3576521.5	5200890.7	0.07	0.08	0.07
5	Escollera norte-sección morro	3577232.3	5200687.6	0.50	0.35	0.30
6	Escollera norte-sección N11	3577206.9	5200703.7	0.30	0.15	0.14
7	Escollera norte-sección N10	3577011.6	5200809.8	0.09	0.03	0.04
8	Escollera norte-sección N5	3576765.8	5200935.3	0.06	0.02	0.03
9	Playa p/futura ampliación port.-punto1	3576705.5	5200948.7	0.11	0.05	0.07
10	Playa p/futura ampliación port.-punto2	3576723.5	5200897.4	0.23	0.10	0.16
11	Playa p/futura ampliación port.-punto3	3576741.5	5200846.1	0.26	0.13	0.20
12	Playa frente al muelle pesquero	3576561.6	5200734.5	0.23	0.33	0.26
13	Canal acceso- a 200m de la boca	3577098.0	5200639.1	0.48	0.61	0.59
14	Canal acceso- a 400m de la boca	3576904.3	5200698.3	0.30	0.20	0.28
15	Canal acceso- a 600m de la boca	3576713.4	5200762.3	0.18	0.12	0.15

### PRELIMINAR N°3

Estación	Descripción del punto	Coordenadas		ESCENARIO		
		X(m)	Y(m)	2	7	8
				K (%)	K (%)	K (%)
1	Boca de acceso al puerto	3577250.4	5200732.6	1.04	0.62	0.51
2	Futuro muelle pesquero-punto1	3576627.6	5200834.0	0.15	0.32	0.24
3	Futuro muelle pesquero-punto2	3576557.3	5200870.7	0.10	0.25	0.17
4	Futuro muelle pesquero-punto3	3576521.5	5200890.7	0.09	0.25	0.16
5	Escollera norte-sección morro	3577202.0	5200789.6	0.37	0.68	0.39
6	Escollera norte-sección N11	3577173.9	5200799.8	0.40	0.89	0.53
7	Escollera norte-sección N10	3577046.7	5200850.6	0.29	0.26	0.33
8	Escollera norte-sección N5	3576765.0	5200948.2	0.07	0.07	0.07
9	Playa p/futura ampliación port.-punto1	3576699.9	5200948.4	0.07	0.08	0.11
10	Playa p/futura ampliación port.-punto2	3576719.0	5200896.9	0.19	0.19	0.22
11	Playa p/futura ampliación port.-punto3	3576738.1	5200845.5	0.28	0.28	0.35
12	Playa frente al muelle pesquero	3576561.6	5200734.5	0.16	0.26	0.18
13	Canal acceso- a 200m de la boca	3577050.6	5200723.1	0.22	0.51	0.29
14	Canal acceso- a 400m de la boca	3576850.8	5200713.7	0.28	0.59	0.45
15	Canal acceso- a 600m de la boca	3576652.0	5200777.0	0.21	0.38	0.32

### PRELIMINAR N°4

Estación	Descripción del punto	Coordenadas		ESCENARIO		
		X(m)	Y(m)	2	7	8
				K (%)	K (%)	K (%)
1	Boca de acceso al puerto	3577190.9	5200763.7	0.63	0.89	0.78
2	Futuro muelle pesquero-punto1	3576627.6	5200834.0	0.12	0.21	0.18
3	Futuro muelle pesquero-punto2	3576557.3	5200870.7	0.07	0.15	0.12
4	Futuro muelle pesquero-punto3	3576521.5	5200890.7	0.06	0.16	0.12
5	Escollera norte-sección morro	3577142.2	5200811.7	0.42	0.31	0.37
6	Escollera norte-sección N11	3577117.5	5200829.2	0.24	0.13	0.21
7	Escollera norte-sección N10	3577052.3	5200870.3	0.12	0.06	0.11
8	Escollera norte-sección N5	3576774.1	5201025.5	0.04	0.04	0.04
9	Playa p/futura ampliación port.-punto1	3576710.9	5201019.2	0.07	0.08	0.09
10	Playa p/futura ampliación port.-punto2	3576727.1	5200944.4	0.14	0.13	0.20
11	Playa p/futura ampliación port.-punto3	3576743.3	5200869.6	0.17	0.23	0.25
12	Playa frente al muelle pesquero	3576561.6	5200734.5	0.20	0.37	0.29
13	Canal acceso- a 200m de la boca	3576992.5	5200738.6	0.30	0.74	0.50
14	Canal acceso- a 400m de la boca	3576794.1	5200713.4	0.21	0.53	0.37
15	Canal acceso- a 600m de la boca	3576593.0	5200810.1	0.12	0.25	0.20

A los efectos de facilitar la comparación entre los tres proyectos, los coeficientes de transformación indicados en las tablas precedentes se han graficado por grupos de estaciones fijas para cada escenario, en las figuras 17 a 22. Debe recordarse que la altura de ola de referencia es de  $H_o=6,60$  m para el escenario 2,  $H_o=4,80$  m para el escenario 7 y  $H_o=5,20$  m para el escenario 8.

En la zona del futuro muelle pesquero, la configuración Preliminar 3 presenta los coeficientes de atenuación más desfavorables para todos los escenarios, alcanzando en algunos casos valores del orden de los 25 a 32 % (escenario 7 y 8). Para los escenarios 7 y 8, la menor agitación en esta zona se alcanza con la configuración Preliminar 1: el coeficiente de atenuación es 14% en

la estación 2 y menos de 10% en las estaciones 3 y 4, de acuerdo a la numeración de las tablas presentadas en el texto. En la configuración Preliminar 4, el más desfavorable coeficiente de atenuación es 21% (escenario 7 en la estación 2). Para el escenario 2, la agitación en el muelle es similar en las configuraciones Preliminar 1 y 4 con coeficientes de atenuación del orden del 7 al 12% en ambos casos.

Las estaciones 13, 14 y 15, definidas a 200, 400 y 600 m de la boca del puerto, por sobre el canal de navegación, no coinciden espacialmente para las distintas configuraciones. Sin embargo, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

Como era de esperar, la agitación disminuye desde la boca hacia el interior del puerto, siempre sobre el canal de navegación. A 200 m de la boca del puerto, la menor agitación ocurre con la configuración Preliminar 3, para todos los escenarios. Sin embargo, el coeficiente más desfavorable, que corresponde al escenario 7 en todos los casos, se presenta en la configuración Preliminar 4.

A 400 m de la boca del puerto y para el caso del escenario 2, la configuración Preliminar 4 presenta la mejor protección, pero para los escenarios 7 y 8 esta condición es alcanzada por la configuración Preliminar 1, con una atenuación de 28% en el peor de los casos.

A 600 m de la boca del puerto, la configuración Preliminar 3 presenta la peor atenuación para todos los escenarios. La configuración Preliminar 4 brinda mejor protección que la 1 para el escenario 2 y la situación es inversa para los otros dos escenarios.

La tabla que sigue muestra, en forma comparativa la peor situación posible dentro del puerto para cada una de las tres configuraciones estudiadas con un período de retorno de 50 años. En primer lugar, a partir de las tablas anteriores, se determinó un coeficiente de transformación medio cuadrático  $K$  dado por:

$$K = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i^2}$$

donde  $K_i$  es el coeficiente de atenuación correspondiente a cada una de las estaciones de las tablas,  $N$  el número total de estaciones (15). La altura media  $H$  resulta de multiplicar el coeficiente medio  $K$  por el valor de  $H_0$  del escenario correspondiente. Tanto  $K$  como  $H$  tienen el sentido de un valor promedio espacial dentro del área portuaria.

Al pie de la tabla 5.6. se indica el mayor valor de  $H$  para cada una de las configuraciones,  $H_{MAX}$ . De esto surge que la configuración Preliminar 4 presenta, en términos globales para todas las estaciones dentro del puerto y todos los escenarios analizados, la menor altura media de ola ( $H=1.80m$ ), seguida de la configuración Preliminar 1, con  $H = 2.11m$ . La más desfavorable resulta la Preliminar 3 con  $H=2.30 m$ .

Tabla 5.6. Comparación de resultados

Escenario	Ho	PP1		PP3		PP4	
		K	H(m)	K	H(m)	K	H(m)
2	6.60	0.32	2.11	0.35	2.30	0.24	1.60
7	4.80	0.30	1.42	0.44	2.09	0.37	1.80
8	5.20	0.28	1.46	0.32	1.66	0.32	1.64
	HMAX		2.11		2.30		1.80

## CONCLUSIONES

1. Un nuevo estudio de clima de olas arrojó como resultado valores extremos de altura de ola algo superiores a los indicados en la información de base de estudios previos. En el presente estudio se adoptaron en consecuencia los primeros. Se adoptó una marea astronómica extrema, y el máximo valor de sobreelevación por efecto meteorológico indicado en estudios previos. En este sentido el proyecto se ha definido considerando las condiciones extremas más desfavorables posibles.
2. El emplazamiento resulta expuesto especialmente a las olas oceánicas de las direcciones SE al ENE, es decir un sector inferior a  $90^\circ$ . Las olas más frecuentes y los temporales más intensos que pueden llegar al punto de emplazamiento provienen del sector SE. La refracción de las olas oceánicas hasta el lugar del emplazamiento modifica considerablemente el ángulo de llegada, resultando un sector de procedencia aparente de unos  $40^\circ$ , centrado en dirección ESE.
3. La orientación de la entrada del puerto y del canal de acceso fueron modificadas en el curso del estudio, para favorecer la protección del área portuaria para las direcciones de ola más intensas y las más frecuentes, habida cuenta de lo expuesto en los puntos 1) y 2).
4. En términos globales, la configuración Preliminar 4 ofrece las mejores condiciones de abrigo para las estaciones fijas analizadas ubicadas dentro del recinto portuario, y para los escenarios de cálculo asumidos, correspondientes a un período de retorno de 50 años. En ningún caso se detectaron puntos de resonancia.
5. En la boca del puerto, en el morro de la escollera norte y en la cara interna de la escollera norte la configuración Preliminar 4 presenta los mínimos valores de altura de ola para las situaciones analizadas.
6. En el canal de acceso la configuración Preliminar 4 también presenta el valor mínimo a los 600 m de la boca de acceso, mientras que a 200 y 400 m esta condición corresponde a las configuraciones Preliminar 3 y 1, respectivamente. Desde el punto de vista de coeficientes de atenuación referidos a la altura de ola en aguas profundas, y considerados de manera global para los escenarios analizados, los valores más desfavorables ocurren para las configuraciones Preliminar 1 y 3.
7. En el área de muelles las configuraciones Preliminar 1 y 4 ofrecen de altura de ola del mismo orden (1 m para 50 años de recurrencia), mientras que en la configuración Preliminar 3 la altura de ola asciende a 1.6 m para el mismo período de retorno.
8. Todas las configuraciones ensayadas producen reflexión y difracción de los frentes provenientes del cuadrante SE en el extremo de la escollera sur, lo que permite solamente el ingreso de una fracción de la energía incidente al interior del recinto portuario. Para el caso de las olas provenientes del cuadrante NE, la presencia de la boca del puerto es menos

significativa. Para algunos casos (por ejemplo los escenarios 7 y 8) parte del frente incidente logra atravesar la boca prácticamente sin interactuar con las estructuras de protección.

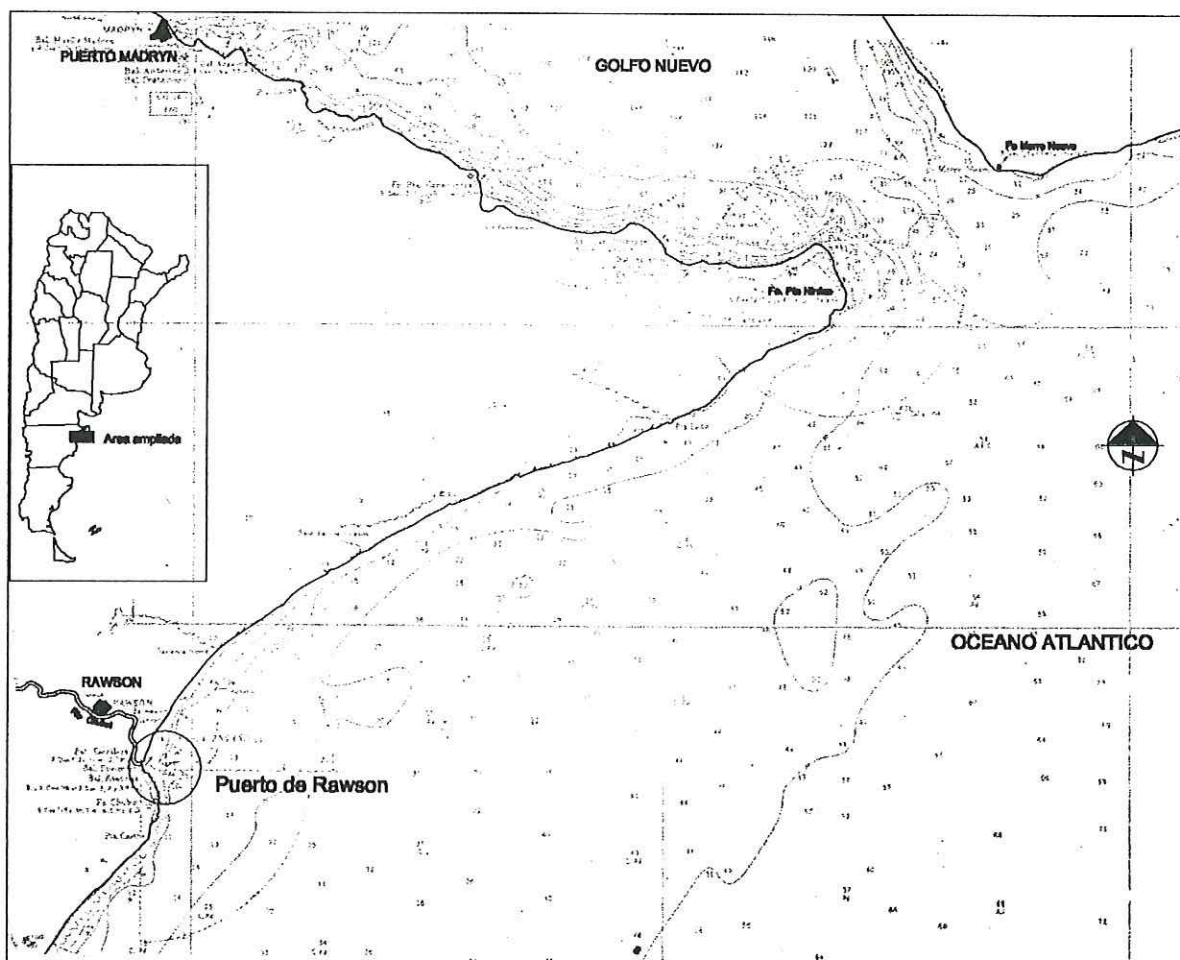
9. Para los escenarios ensayados, en todas las configuraciones se observa que la franja longitudinal adyacente al borde interior de la escollera norte presenta agitación inferior a la que se aprecia en el canal de navegación y la escollera sur. En casi todos los casos, la altura esperable está por debajo de los 0.50 m.

---

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Estudio de la Factibilidad de la Remodelación del Puerto de Rawson. Estudios Básicos y Planificación Portuaria. Provincia de Chubut. Unidad Ejecutora Provincial Portuaria.
2. Directional Wave Statistics Offshore Rawson, Argentina. Oceanor. Oceanographic Company of Norway ASA. Junio 2000.
3. Cálculo de la Refracción de Olas Mediante el Método de Rayos. R. Castellano. INCYTH-LHA S4-038-93.
4. Manual on the use of Rock in Hydraulic Engineering. CIRIA Special Publication 83/CUR Report 154.
5. Computation of combined refraction-diffraction, J.C.W. Berkhoff, Proc. 13<sup>th</sup>. Conference on Coastal Engineering, Vancouver, 1972.
6. Estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto mediante simulación numérica, M.A. Cavaliere, A.N. Menéndez y R. Castellano, Revista Int. de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 8, 4, pp. 323-333 (1982)
7. Handbook of Coastal and Ocean Engineering. J. Herbich Ed. 1984

# FIGURAS

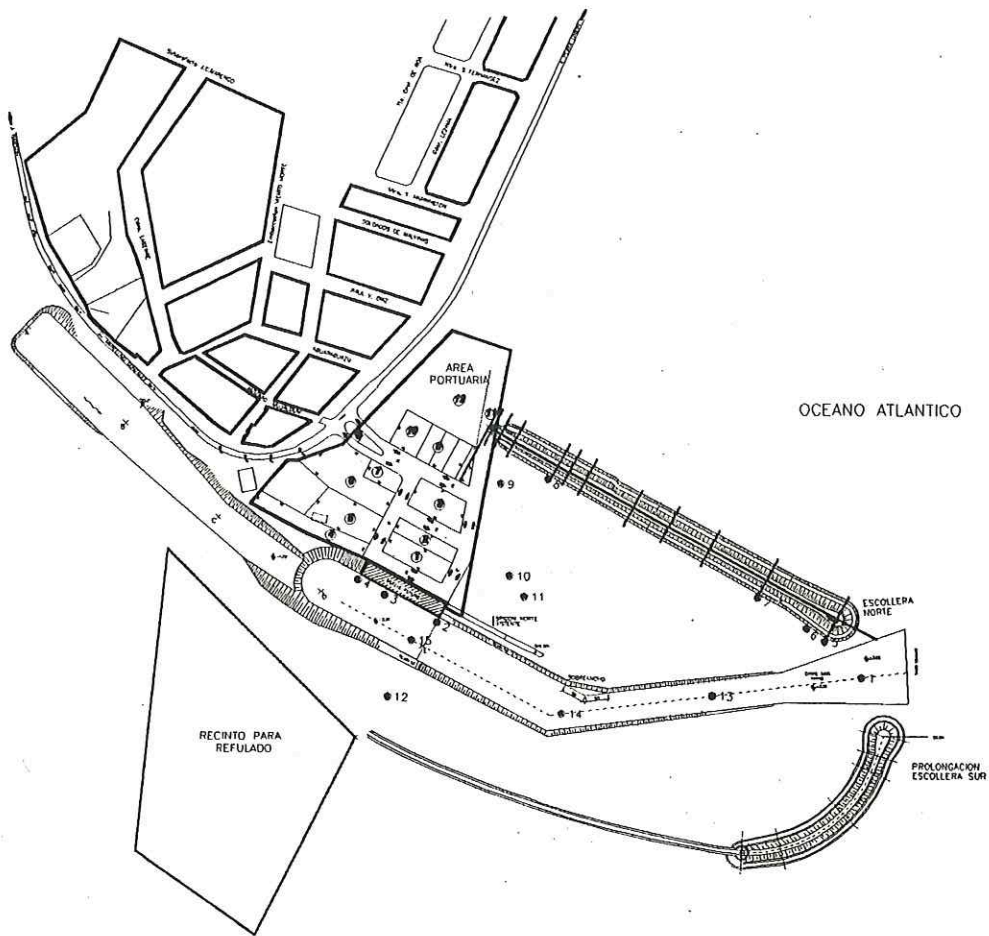


Puerto de Rawson - Plano de Ubicación

Figura 1

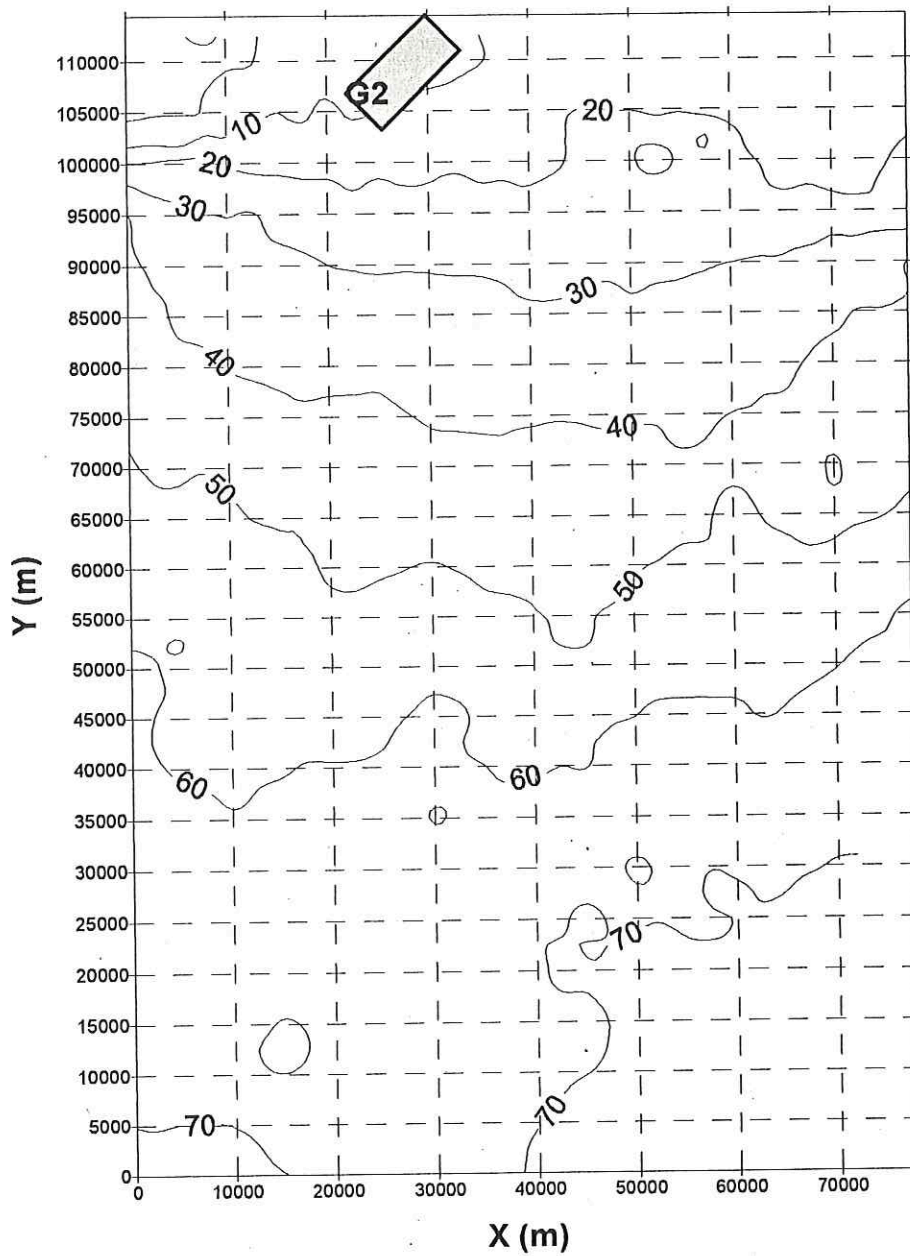






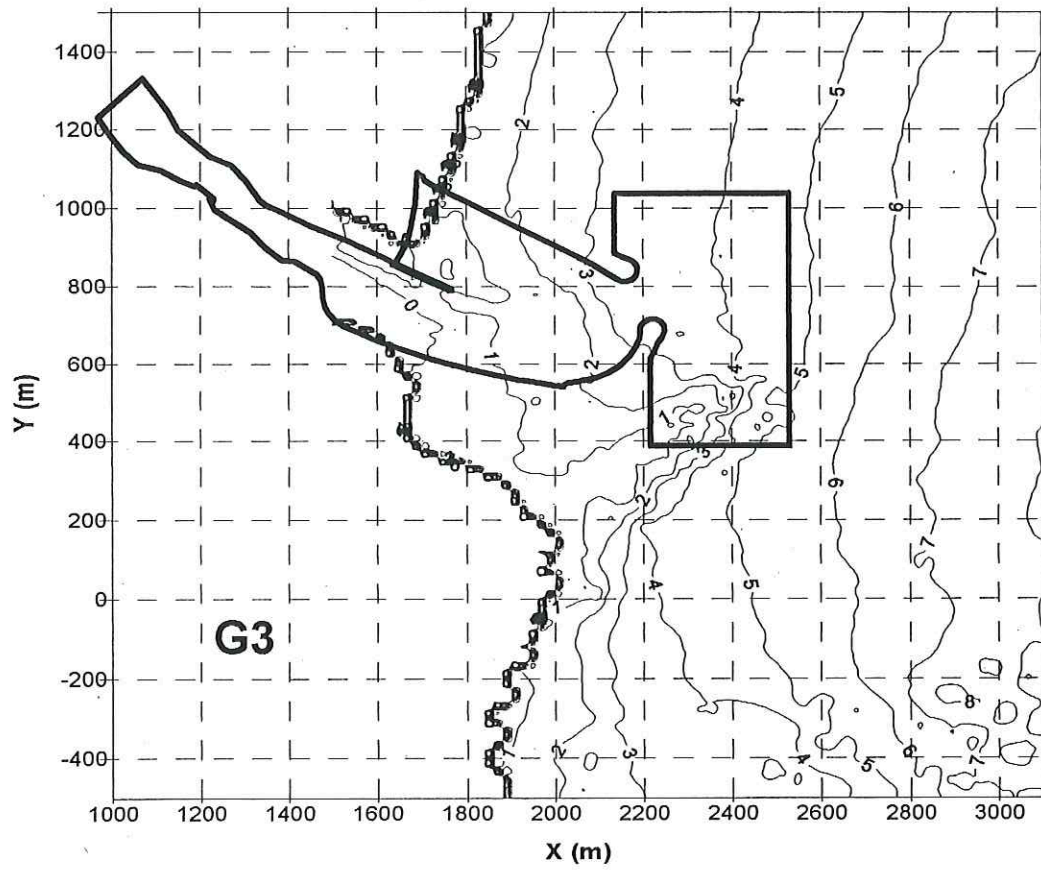
**Planta Portuaria - Preliminar 4**

**Figura 4**



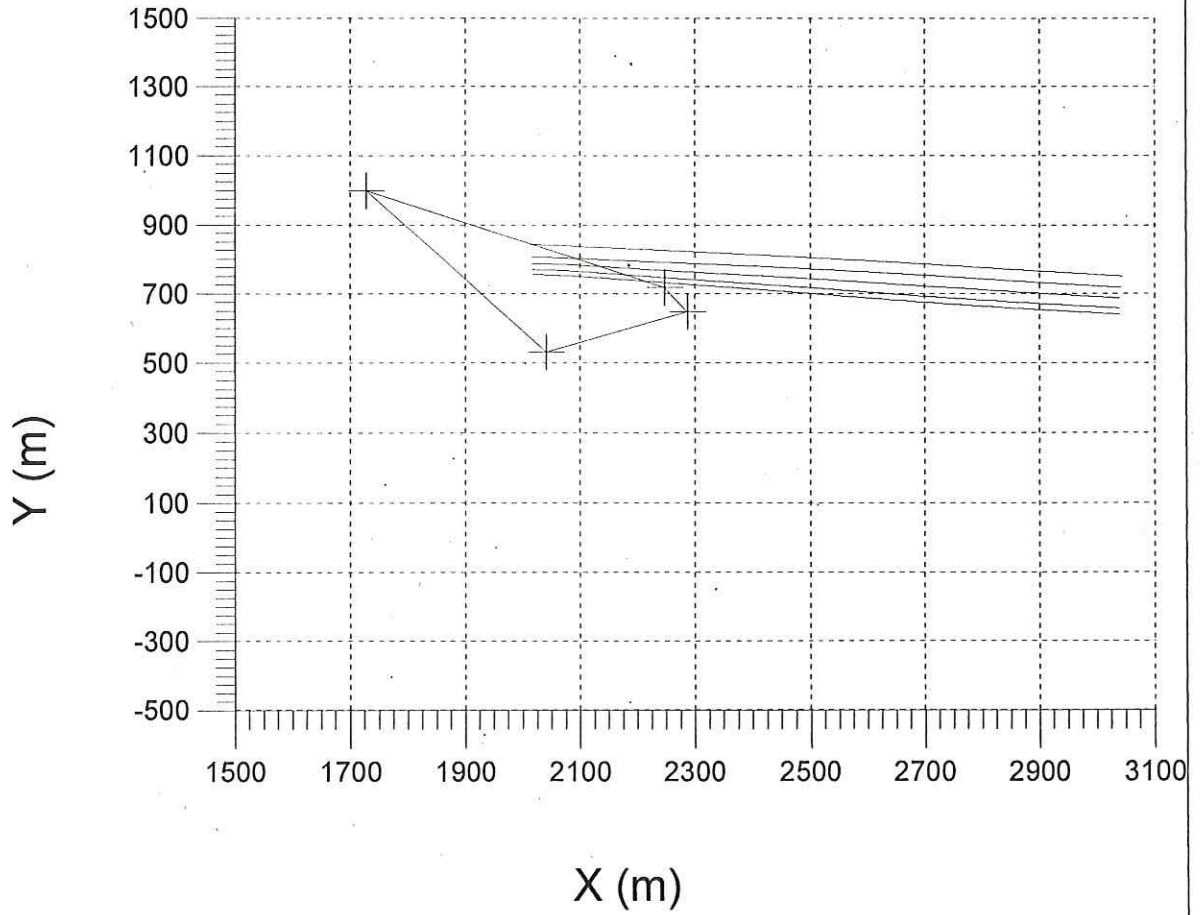
Grillas de Cálculo de Refracción de Olas

Figura 5



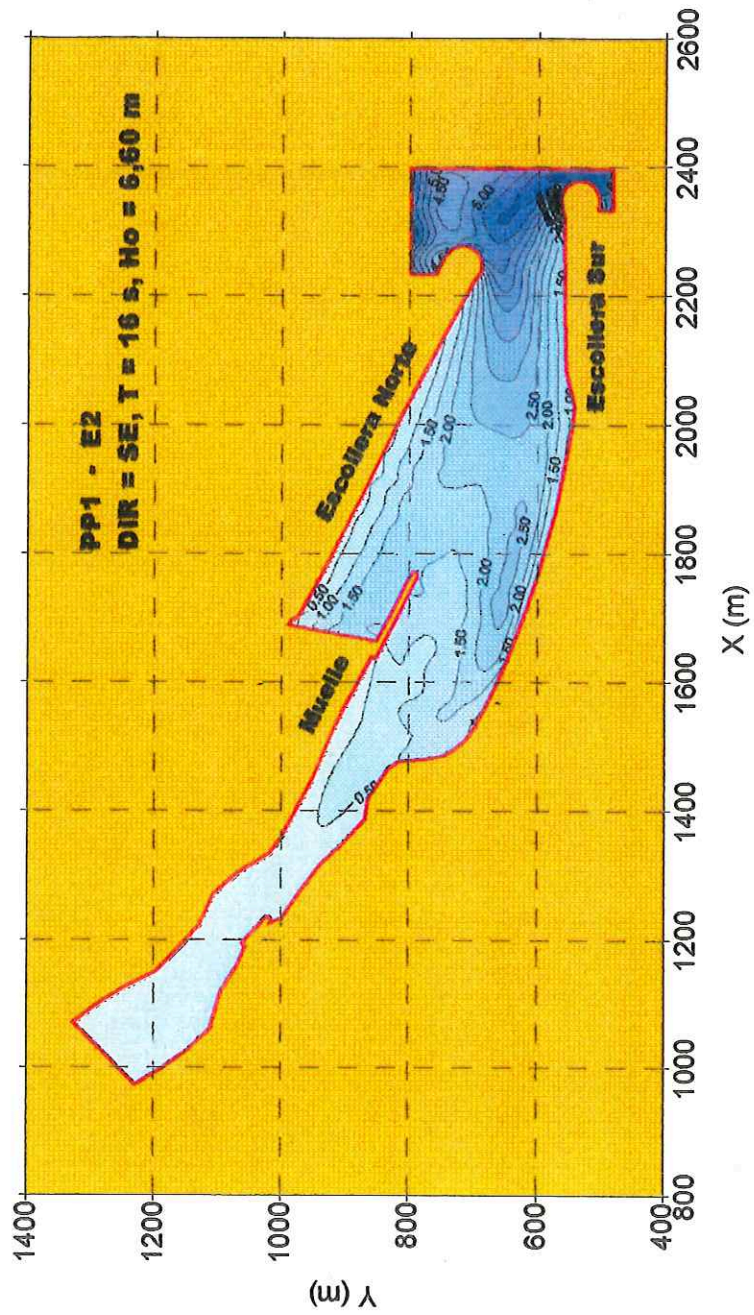
**Grilla 3**

**Figura 6**



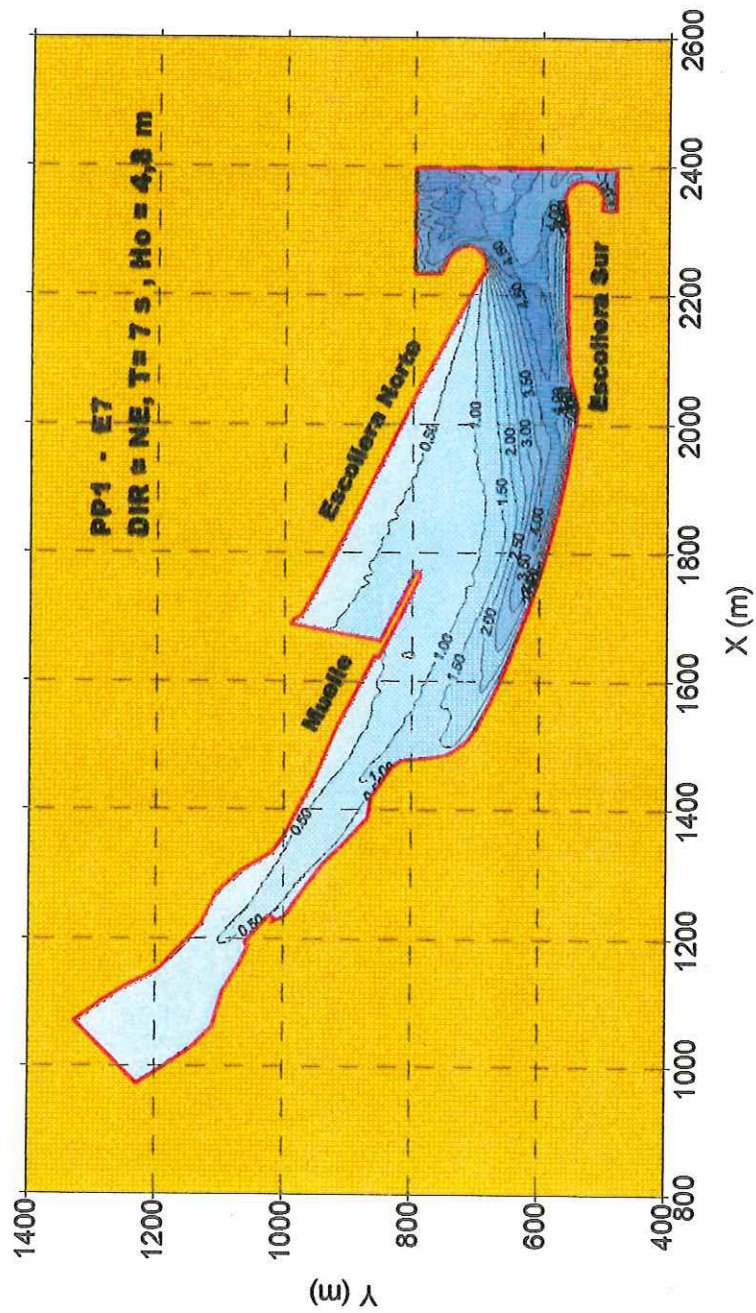
Refracción de Olas en Grilla 3

Figura 7



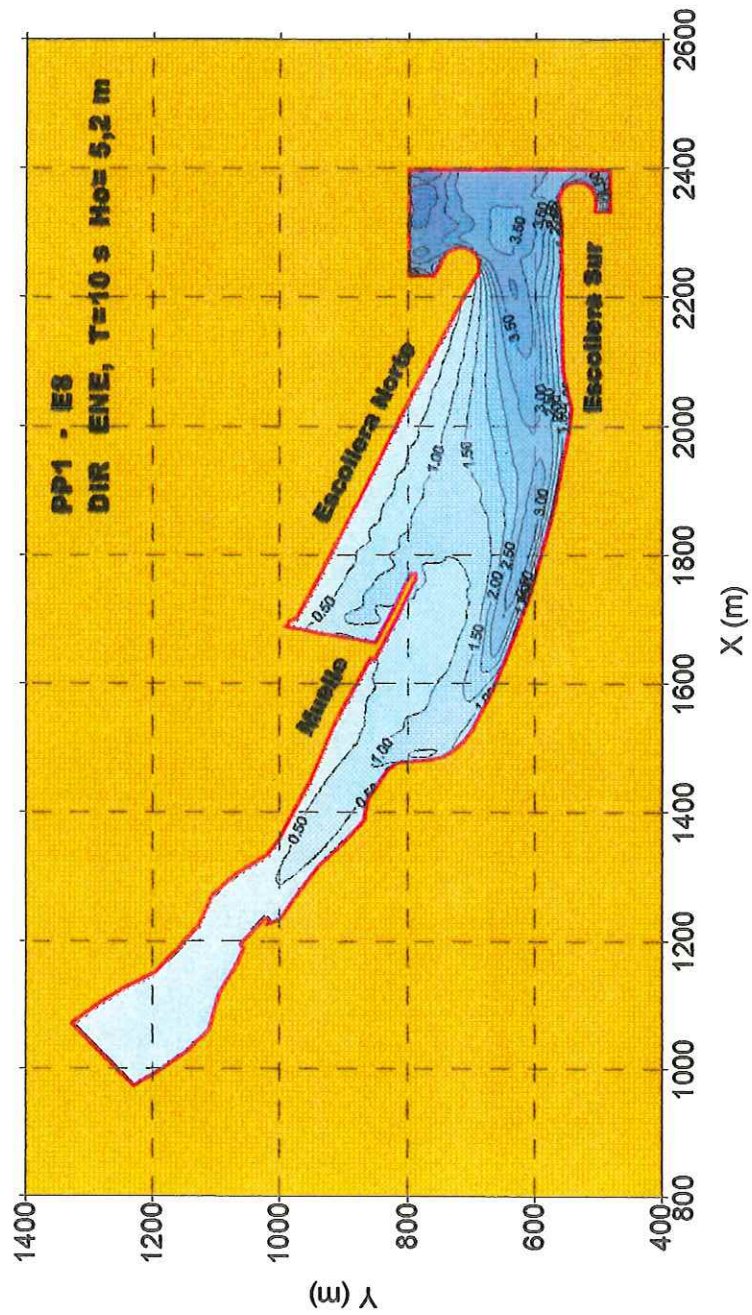
Proyecto Preliminar 1. Escenario 2

Figura 8



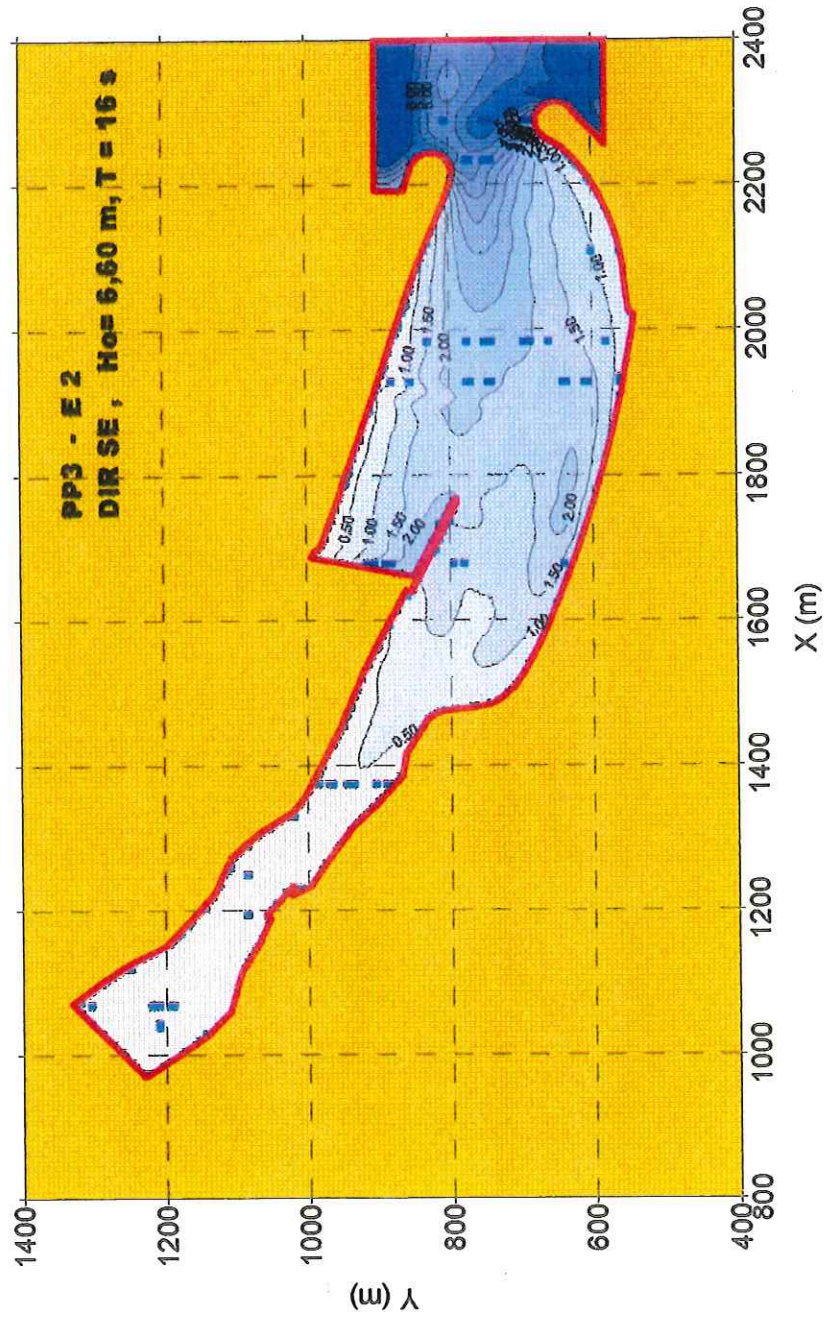
Proyecto Preliminar 1. Escenario 7

Figura 9



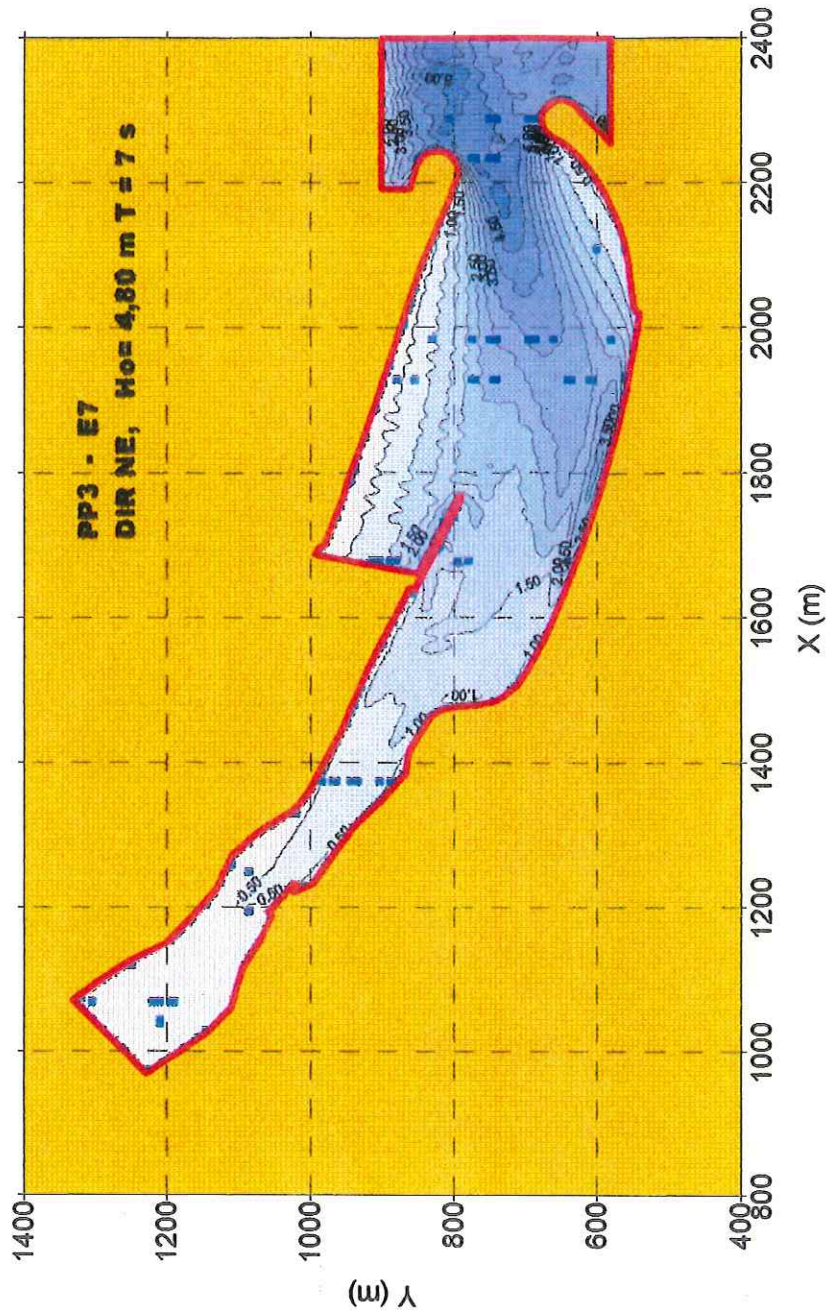
Proyecto Preliminar 1. Escenario 8

Figura 10



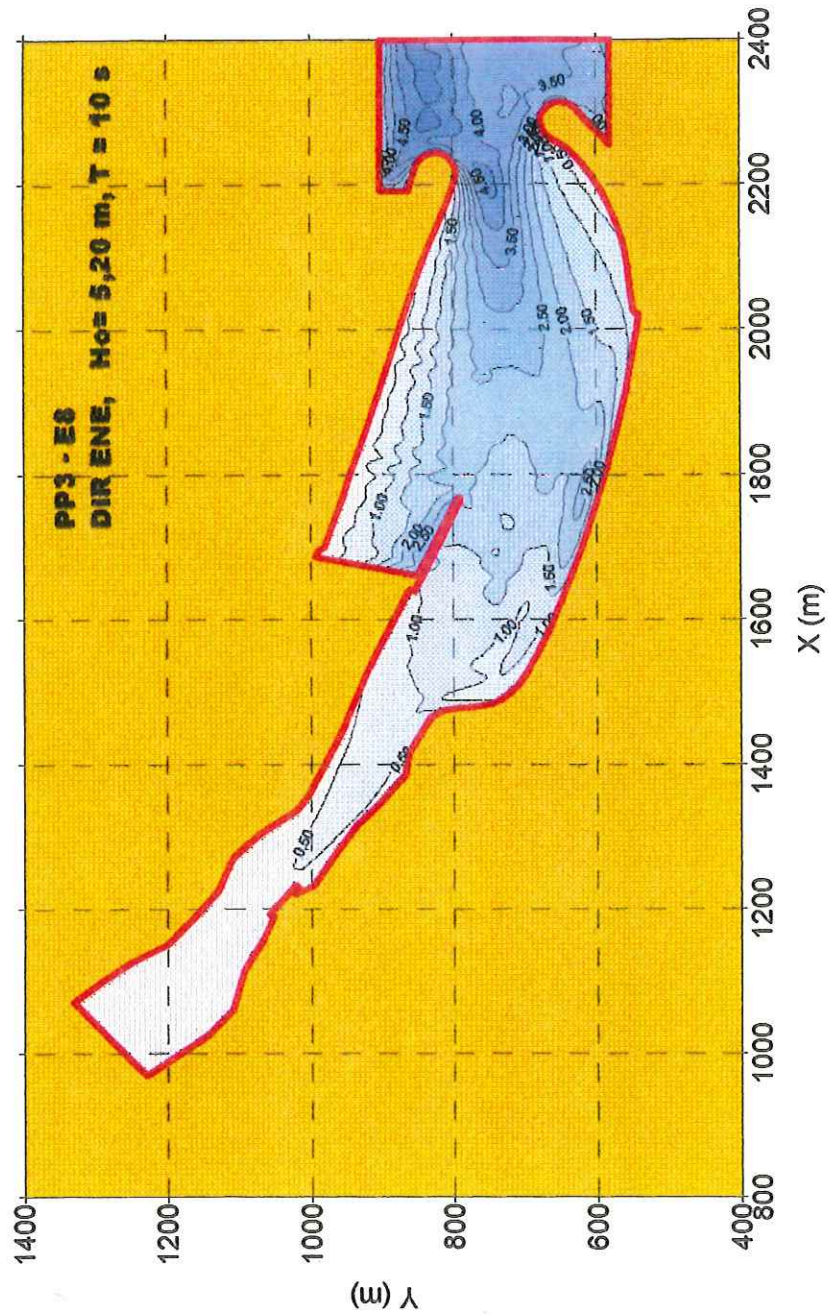
Proyecto Preliminar 3. Escenario 2

Figura 11



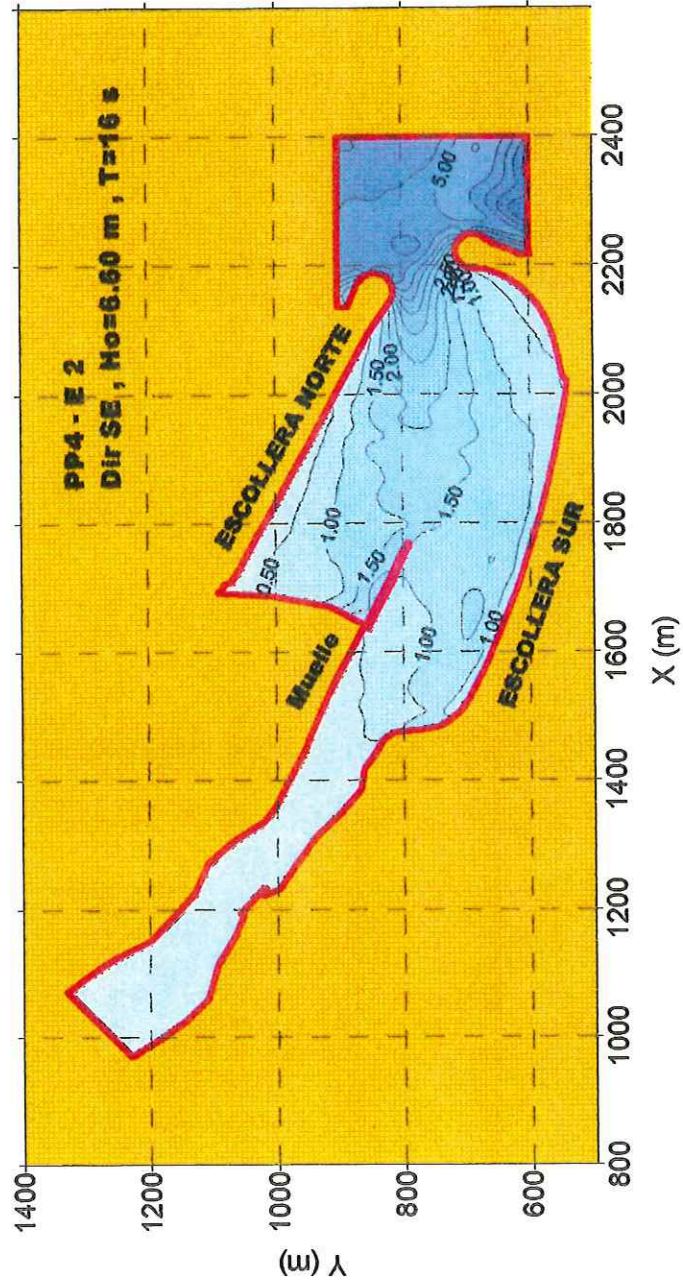
Proyecto Preliminar 3. Escenario 7

Figura 12



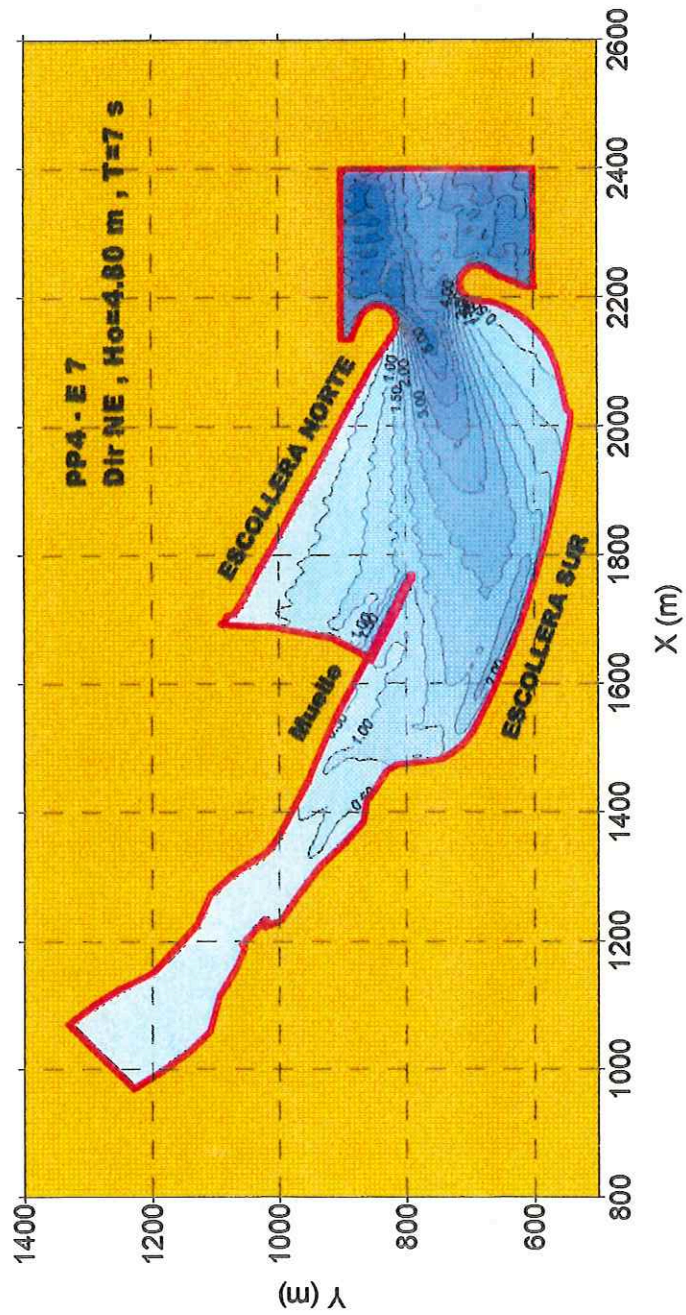
Proyecto Preliminar 3. Escenario 8

Figura 13



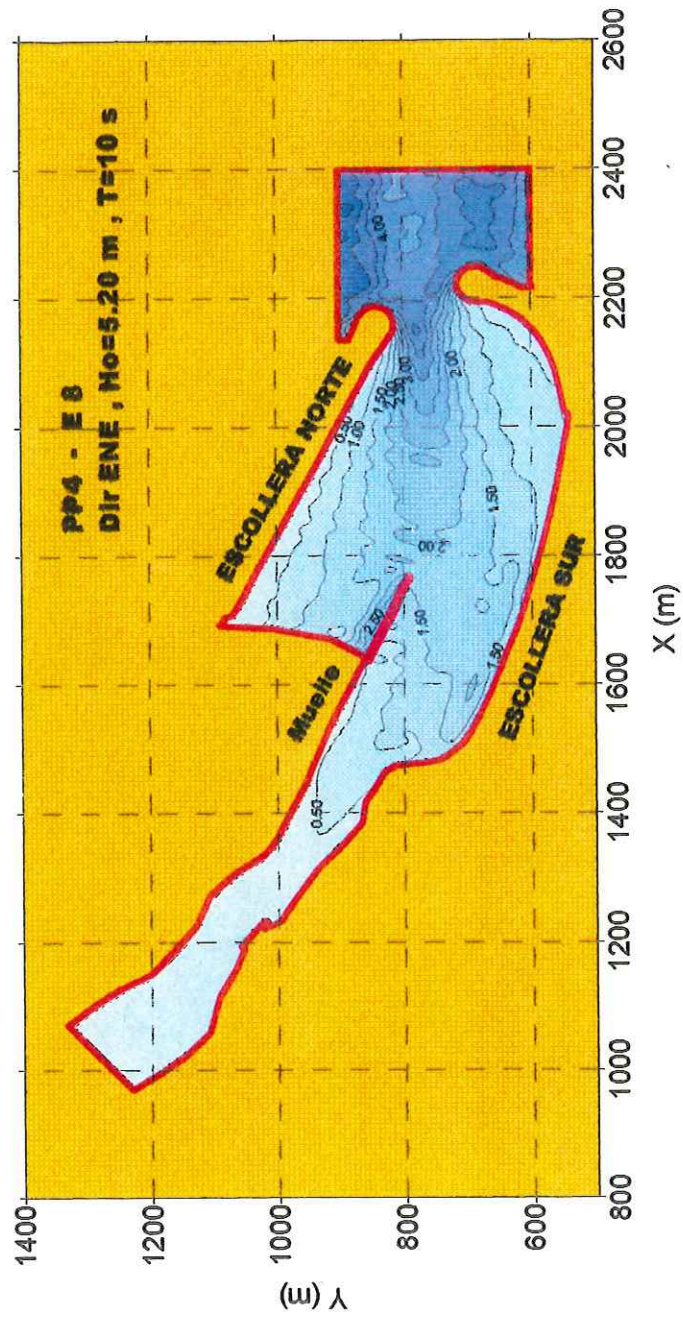
Proyecto Preliminar 4. Escenario 2

Figura 14



Proyecto Preliminar 4. Escenario 7

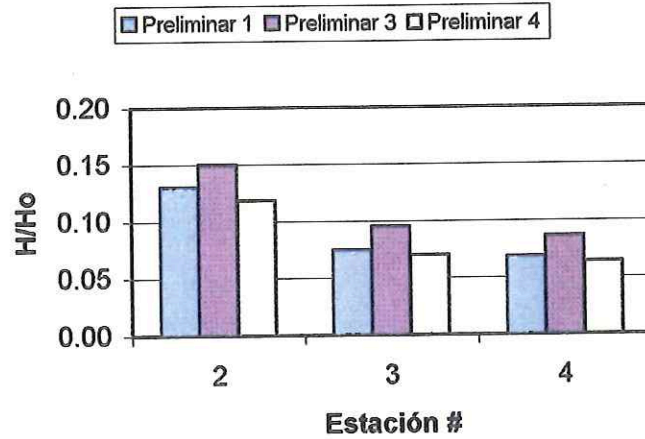
Figura 15



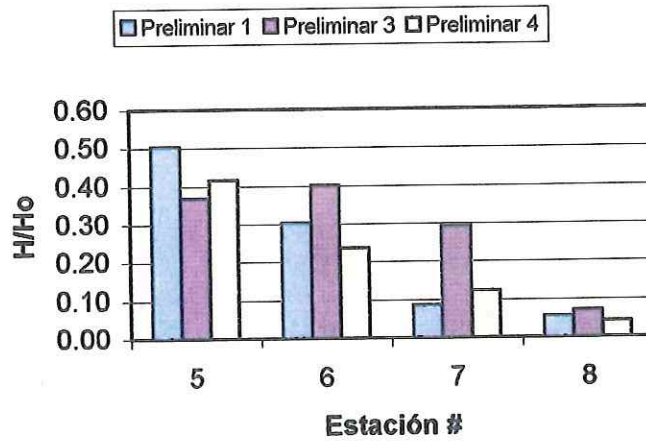
Proyecto Preliminar 4. Escenario 8

Figura 16

**Escenario 2**



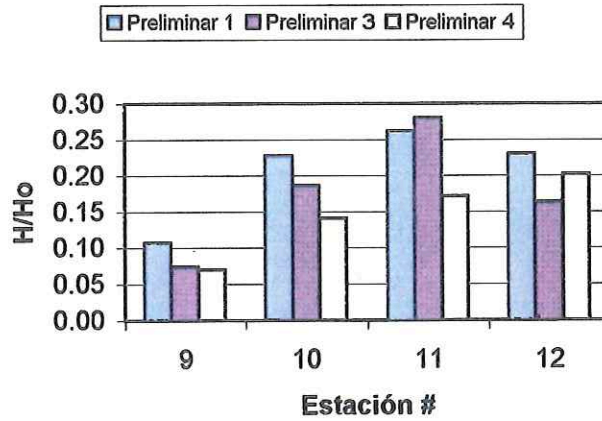
**Escenario 2**



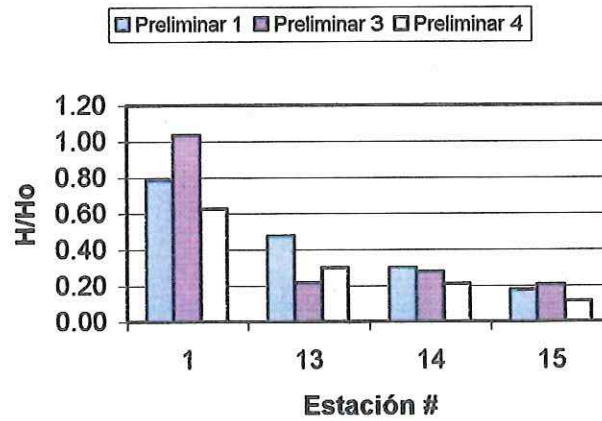
**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 2**

**Figura 17**

**Escenario 2**



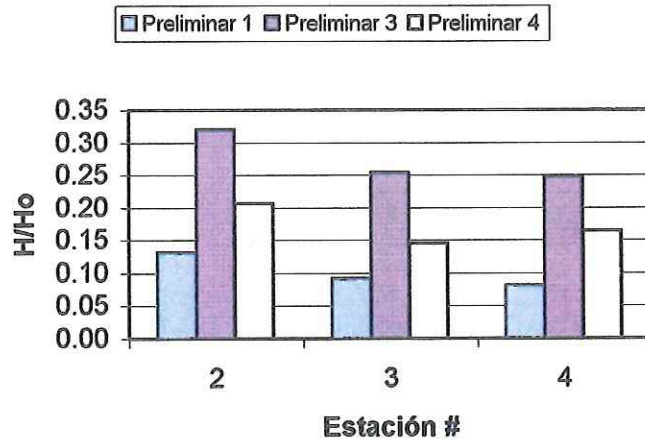
**Escenario 2**



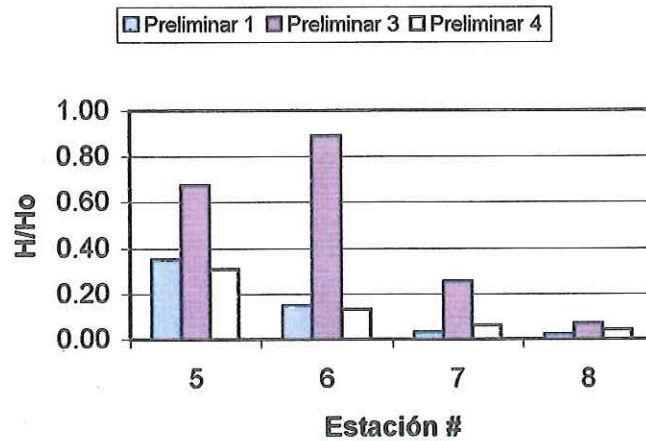
**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 2**

**Figura 18**

**Escenario 7**



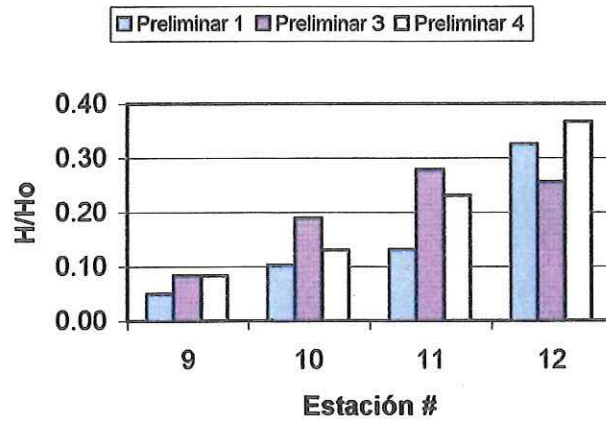
**Escenario 7**



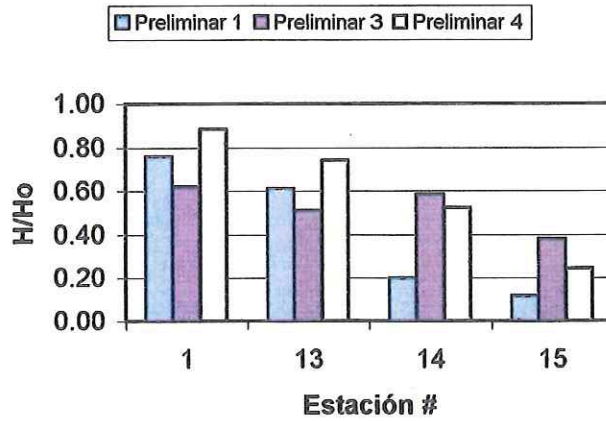
**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 7**

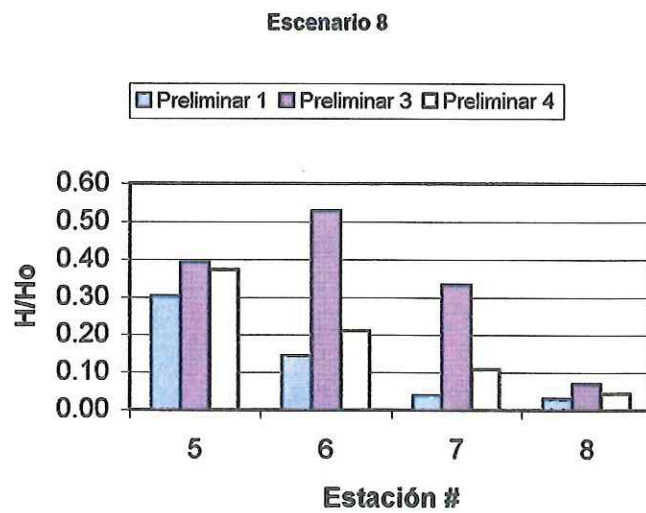
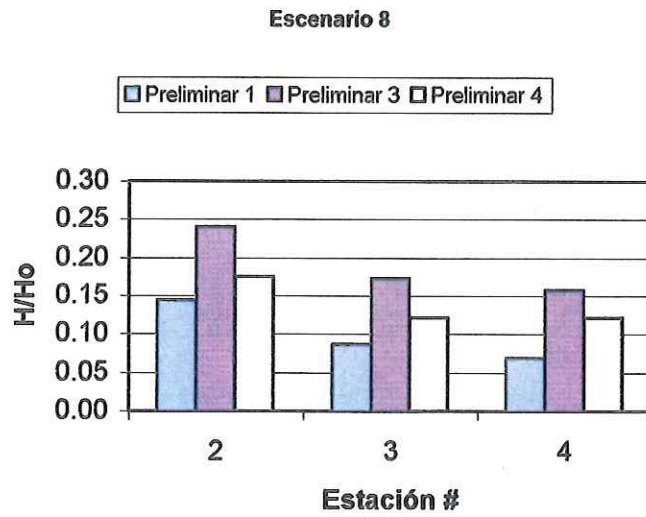
**Figura 19**

**Escenario 7**



**Escenario 7**

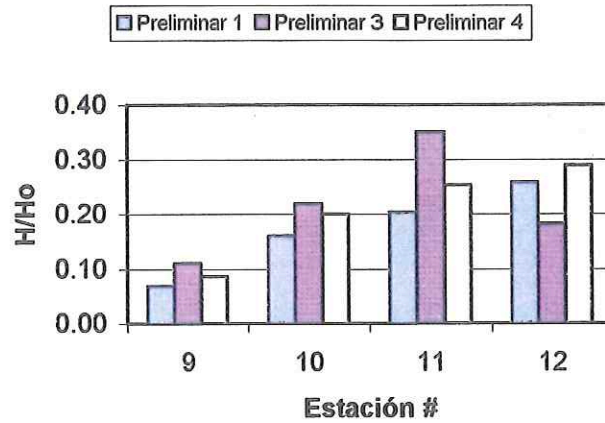




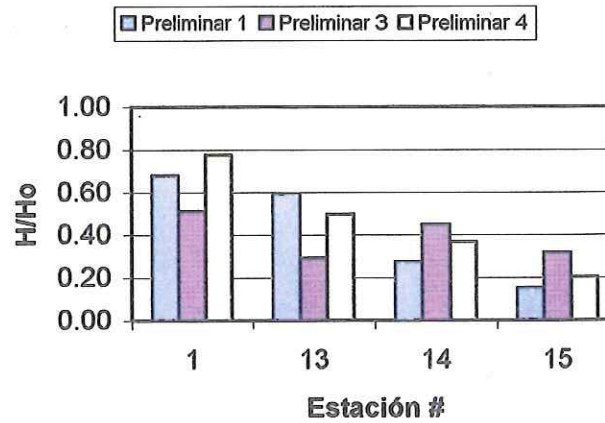
**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 8**

**Figura 21**

**Escenario 8**



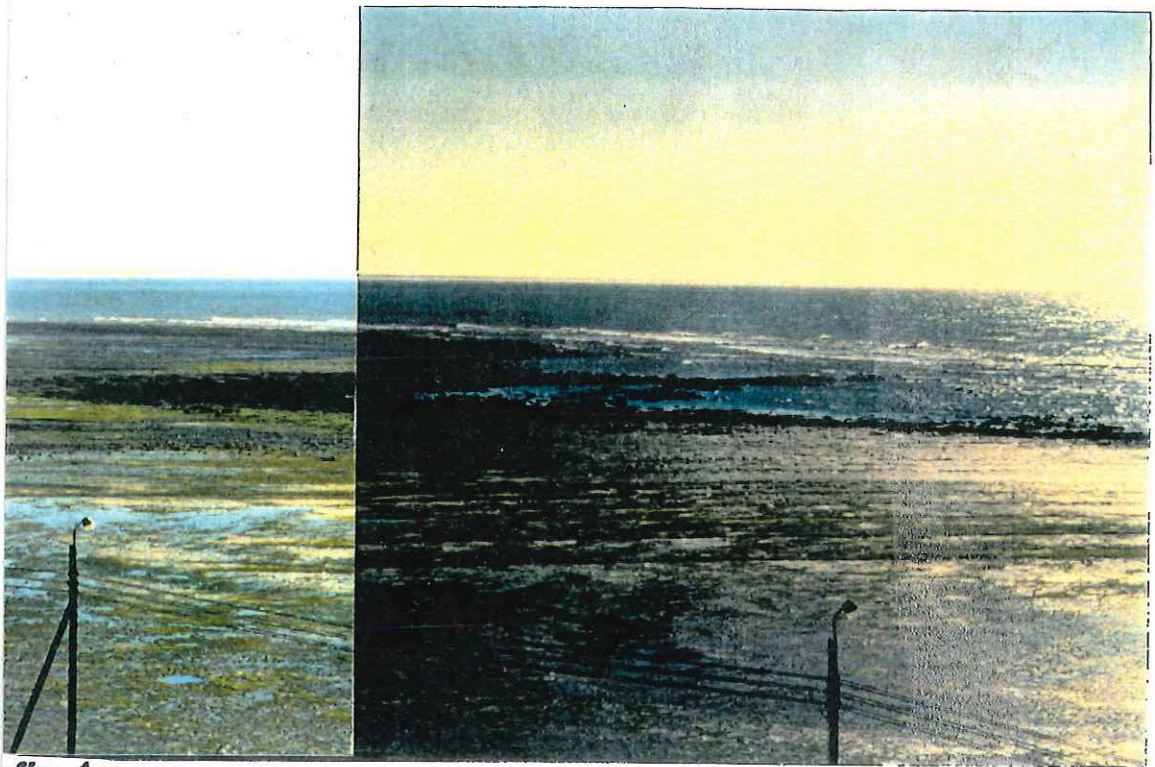
**Escenario 8**



**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 8**

**Figura 22**

# FOTOGRAFIAS



affa 1a



a 1b



**Fotografía 2**



otografia 3a



otografia 3b



**Fotografía 4**



**Fotografía 5**



**Fotografía 6**



**Fotografía 7**



**Fotografía 8**

# ANEXO I

# ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AGITACION POR OLEAJE EN UN PUERTO MEDIANTE SIMULACION NUMERICA

MIGUEL A. CAVALIERE  
ANGEL N. MENENDEZ  
y  
ROBERTO CASTELLANO

*Laboratorio de Hidráulica Aplicada - I.N.C. y T.H.,  
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto de Ezeiza,  
Argentina.*

## RESUMEN

Se describe una aplicación del sistema computacional DIFRAC para estudiar las condiciones de agitación por oleaje dentro de un puerto, teniendo en cuenta el efecto combinado de difracción, refracción y reflexión de las olas. Se presentan resultados para la amplitud y dirección de propagación del oleaje en su interior y de las condiciones de resonancia en las distintas dársenas del puerto.

## SUMMARY

An application of the computational model DIFRAC for the study of wave conditions inside a harbor is described. It takes account of the combined effect of diffraction, refraction and reflection of waves. Results for wave amplitude and wave front propagation direction into the harbor are presented, together with an analysis of resonance conditions for the different docks.

## INTRODUCCION

Un puerto constituye un área de aguas calmas no sólo para garantizar la permanencia en amarra de las embarcaciones bajo adecuadas condiciones de seguridad, sino además para permitir las operaciones que éstas deban realizar: embarque de pasajeros, manipuleo de cargas, abastecimiento, reparación, mantenimiento, etc.

En zonas expuestas a la acción del oleaje, es habitual que se deba recurrir a la construcción de estructuras de protección que limiten su penetración al puerto. Las dimensiones y orientación del acceso al puerto surgen de una solución de compromiso entre las facilidades requeridas por las embarcaciones para acceder al puerto y la energía de oleaje máxima admisible dentro del espejo de agua protegido. La construcción de

Recibido: Noviembre 1991

estas estructuras (obras de abrigo) tiene, habitualmente, una importante incidencia en el costo total del puerto, afectando la rentabilidad en el caso de tratarse de un puerto comercial. Proteger en exceso supone inversiones iniciales innecesariamente altas; por el contrario, proteger en defecto significa costos operativos elevados.

Para la depuración de un proyecto portuario, específicamente en lo que se refiere a protección del oleaje, el ingeniero hidráulico ha recurrido tradicionalmente a los modelos hidráulicos, es decir, a la simulación física del problema en escala reducida. Mediante esta técnica el ingeniero proyectista tiene la posibilidad de "ver" cómo las obras interactúan con el oleaje, facilitándole la interpretación de la compleja hidrodinámica, originada en la coexistencia de los fenómenos de difracción, refracción y reflexión, y la formulación de diagnósticos y propuestas de soluciones. La principal dificultad con la simulación física es su alto costo en infraestructura (superficies cubiertas del orden de 500 a 1000 m<sup>2</sup>, equipo para generación de olas, instrumentación electrónica específica para la adquisición de datos), implementación (costo de construcción) y operación (energía eléctrica, personal auxiliar). Además, para escalas del orden de 1:150 a 1:200 los efectos de escala comienzan a distorsionar los resultados.

Estos inconvenientes, sumados a la reciente formulación de modelos teóricos confiables de agitación por oleaje, el persistente incremento de la potencia de cálculo de las computadoras, a costos cada vez menores, y los avances en los métodos de resolución numérica de ecuaciones diferenciales y de las técnicas de visualización de resultados, han colocado a la simulación numérica en una posición ventajosa tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este trabajo se presenta un estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto deportivo a construirse en Punta del Este (Uruguay). El objetivo es ilustrar el alcance de este tipo de modelos desde un punto de vista práctico.

## MODELO NUMÉRICO

El estudio se realizó con el sistema computacional DIFRAC, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA) del INCYTH. Este modelo permite simular el efecto combinado de refracción, difracción y reflexión de olas, tal como se presenta en los recintos portuarios. Sus detalles técnicos ya han sido expuestos en oportunidades anteriores<sup>1,2</sup>. En lo que sigue se presenta sólo una breve reseña.

La formulación matemática del problema de agitación se basa en la teoría lineal de ondas de pequeña amplitud de tipo armónico y en la hipótesis de que la pendiente del fondo es suave<sup>3</sup>. Bajo esas condiciones, el potencial (complejo) plano de velocidades  $\Phi$ , reducido al nivel medio del agua, satisface la ecuación

$$\nabla \cdot (\alpha \nabla \Phi) + \mathcal{K}^2 \alpha \Phi = 0 \quad (1)$$

donde  $\alpha$  es el producto de las celeridades de fase y de grupo y  $\mathcal{K}$  un coeficiente de modulación vertical de la amplitud de oscilación, relacionado a la frecuencia mediante una relación de dispersión.

La amplitud  $A$  del oleaje puede calcularse a partir del potencial plano reducido a través de la siguiente expresión:

$$A = \frac{\omega}{g} |\Phi| \quad (2)$$

donde  $\omega$  es la pulsación de la ola y  $g$  la aceleración de la gravedad.

La ecuación (1), conocida como Ecuación de Berkhoff, ha sido exhaustivamente verificada en su capacidad de simular adecuadamente el fenómeno de agitación<sup>2,4</sup>. En particular, Booij<sup>5</sup> analizó su comportamiento en problemas con pendientes relativamente fuertes, comparando sus resultados con un modelo tridimensional, y obtuvo acuerdos satisfactorios a pesar de apartarse de una de las hipótesis básicas de la formulación.

Los contornos físicos del recinto portuario pueden comportarse como totalmente reflejantes o parcialmente absorbentes. Estos últimos representan estructuras en las cuales hay disipación de energía, tales como rompeolas, escolleras de enrocado, etc.

El puerto se comunica, a través de su entrada, con el mar, que constituye un dominio "infinito" donde se superponen el oleaje incidente y el de "scattering", resultante de la acción reflejante y difractante del conjunto de estructuras que componen el puerto. El potencial de "scattering" debe satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld.

Con vistas a su resolución numérica, el dominio del problema es dividido en una región interior finita, donde se concentran todos los contornos físicos relevantes, y una región exterior infinita. En la primera es posible reemplazar la formulación diferencial por una variacional. Para la región exterior, en cambio, puede adoptarse una formulación integral indirecta en términos de una distribución de fuentes, lo cual trae como ventaja la posibilidad de resolver el problema exterior sólo sobre el contorno matemático de separación de ambas regiones, denominado frontera de radiación.

En base a esta reformulación del problema, es natural adoptar el método de los elementos finitos para la zona interior y el método de los elementos de contorno para la zona exterior.

## DESCRIPCION DEL PUERTO

El proyecto estudiado corresponde a una marina a construirse, sobre el litoral atlántico de la República Oriental del Uruguay, destinada al amarre de embarcaciones deportivas. Este estudio fue efectuado por la LHA a requerimiento de la consultora LATINOCONSULT S.A.<sup>6</sup>.

En la Figura 1 se presenta un esquema del puerto y se identifican distintas zonas. El acceso desde el mar se logra a través de un canal de navegación de aproximadamente 300 metros de longitud, a cuyos lados se desarrollan dos escolleras de enrocado. La distribución general de las zonas de amarra es de tipo ramificada, distinguiéndose cuatro dársenas (A,B,C,D) y dos canales (zonas E a I). La profundidad en toda la marina es constante, salvo en el canal de acceso. La sección transversal del canal es de tipo trapezoidal, con taludes laterales suaves.

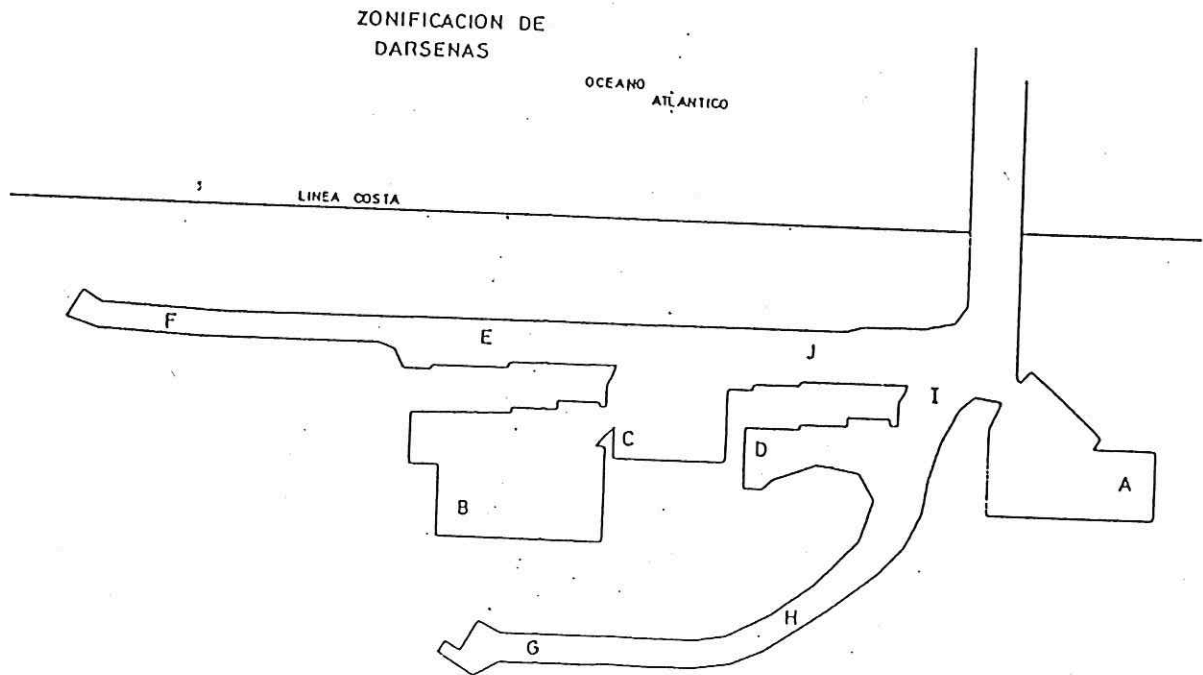


Figura 1. Esquema del puerto.

### IMPLEMENTACION DEL MODELO

La frontera de radiación, que separa las zonas interior y exterior, se ubicó en la boca del canal de acceso, uniendo a las dos escolleras. La mayor parte de las paredes internas de la marina están constituidas por un tablestacado vertical que, desde el punto de vista hidrodinámico, constituye un contorno impermeable sobre el cual el oleaje se refleja totalmente. El tratamiento de estos contornos resultó, entonces, trivial dado que constituyen una condición de borde de tipo natural. Las escolleras y las zonas protegidas con taludes inclinados se trataron como contornos parcialmente absorbentes, con coeficientes de absorción determinados por el proyectista de la obra.

La malla de elementos finitos, mostrada en la Figura 2, fue generada en forma automática, a partir de la planimetría del contorno del puerto, utilizando el programa ENREDO, desarrollado por el grupo de Mecánica Computacional del Centro Atómico de Bariloche de la CNEA. Para lograr una adecuada representación numérica del problema, fue necesario trabajar con una malla de 13657 elementos y 7411 nodos, con lo cual las longitudes de onda más cortas estudiadas fueron representadas, al menos, con 5 elementos. Teniendo en cuenta que el potencial plano  $\Phi$  es complejo el número de incógnitas se duplica. Esto significó un requerimiento de 7 MBytes de memoria para el almacenamiento de los datos y tiempos de máquina en MicroVax del orden de los 80 minutos de CPU por ensayo.

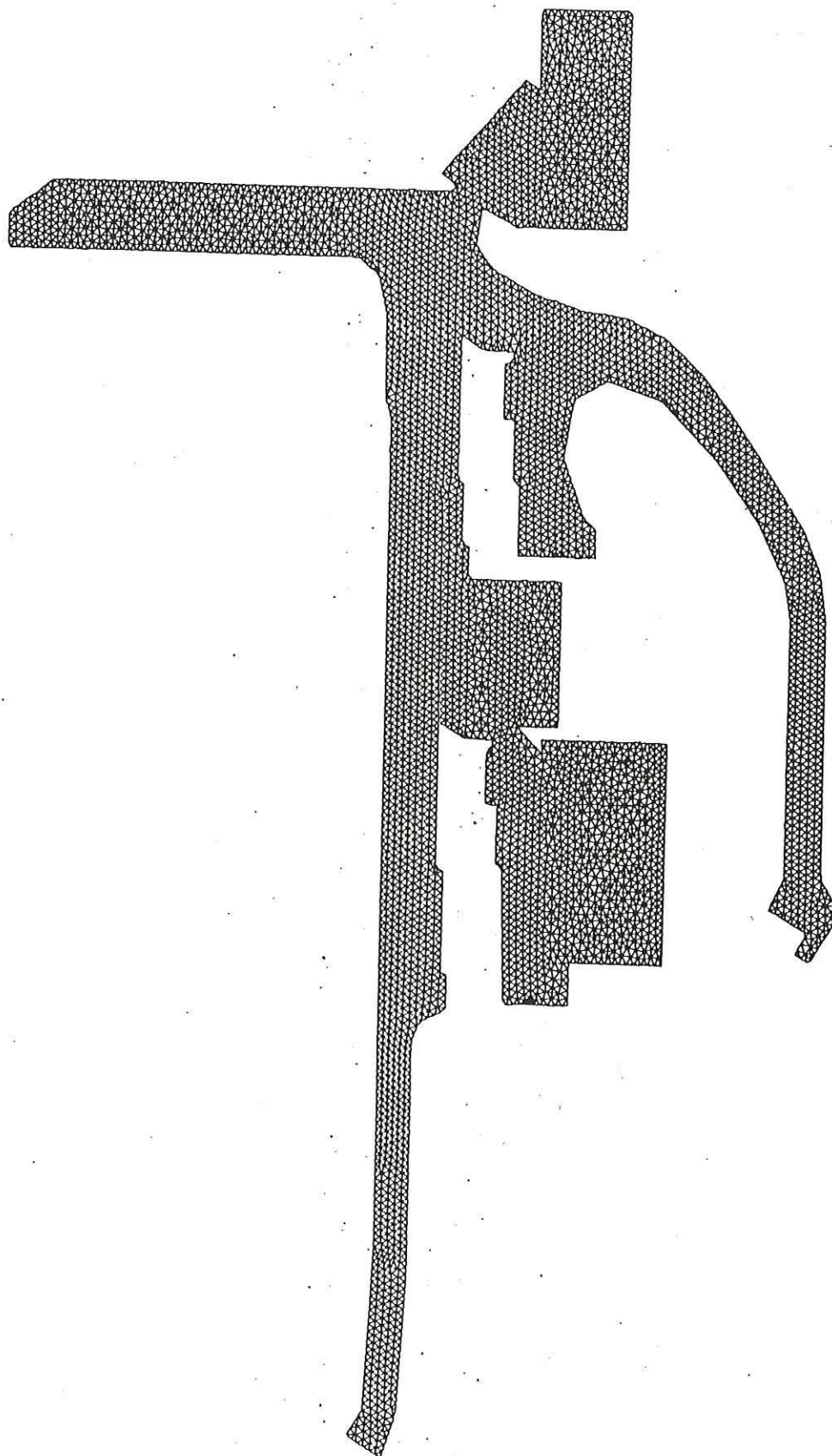


Figura 2. Malla de elementos finitos.

### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se efectuaron ensayos para diferentes condiciones del oleaje incidente, analizándose la efectividad de las estructuras de abrigo. En la Figura 3 se muestra una vista tridimensional de la superficie libre en la zona interior del puerto correspondiente a uno de los ensayos. Se observa que el nivel de agitación es marcadamente distinto en las diferentes dársenas.

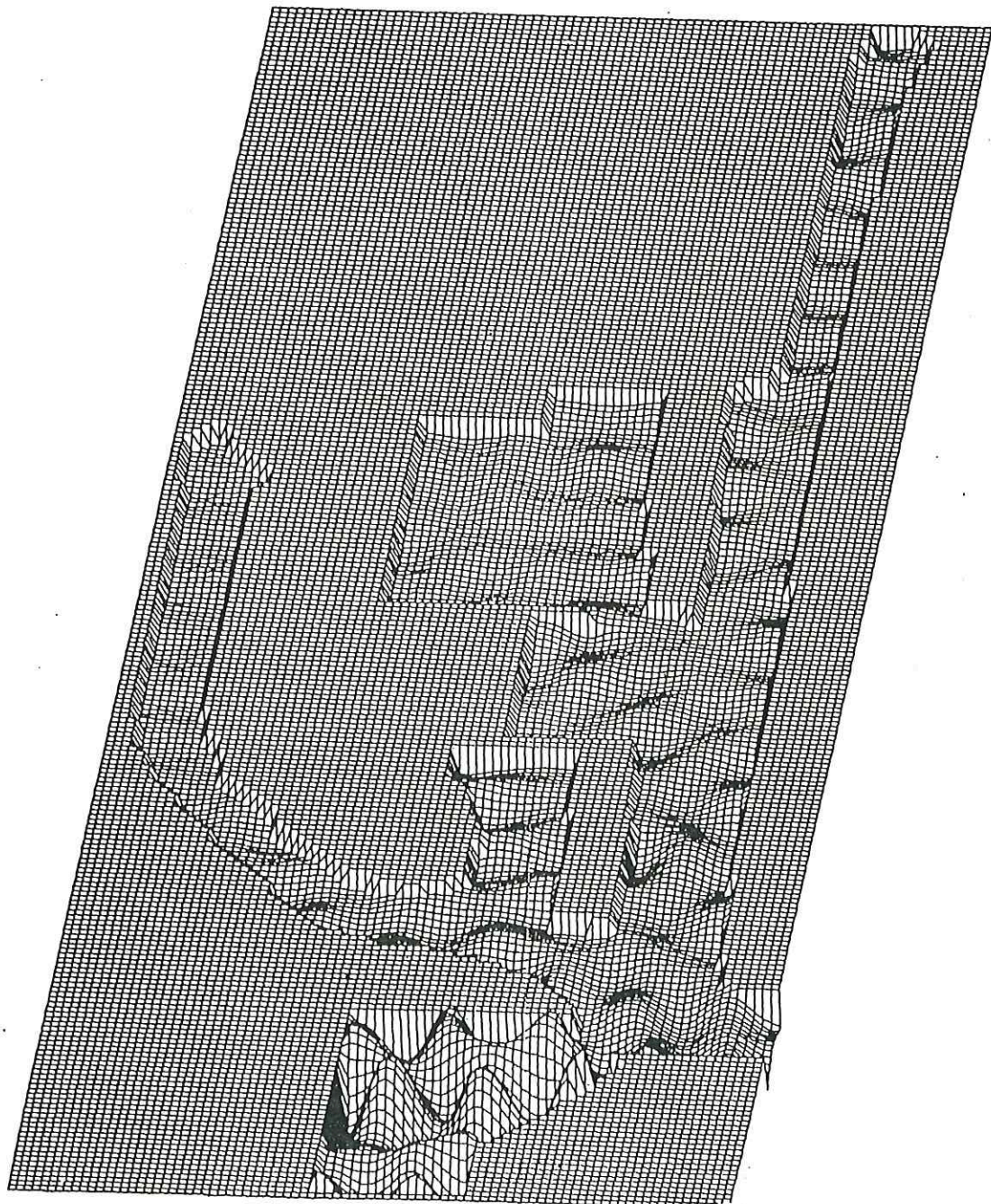


Figura 3. Vista tridimensional del interior del puerto.

En la Figura 4 se representa la amplitud del oleaje a lo largo del canal de acceso. Se observa que la atenuación es muy importante. Para olas con períodos comprendidos entre 5 y 7 segundos, que son las más frecuentes en esa región, la atenuación alcanza el 90 %, siendo algo más leve para períodos mayores. Se determinó que los taludes del canal de acceso juegan un rol muy importante en este proceso, dado que producen un efecto de refracción sobre las olas, orientándolas hacia las escolleras que protegen el canal, las cuales disipan gran parte de la energía de las olas incidentes.

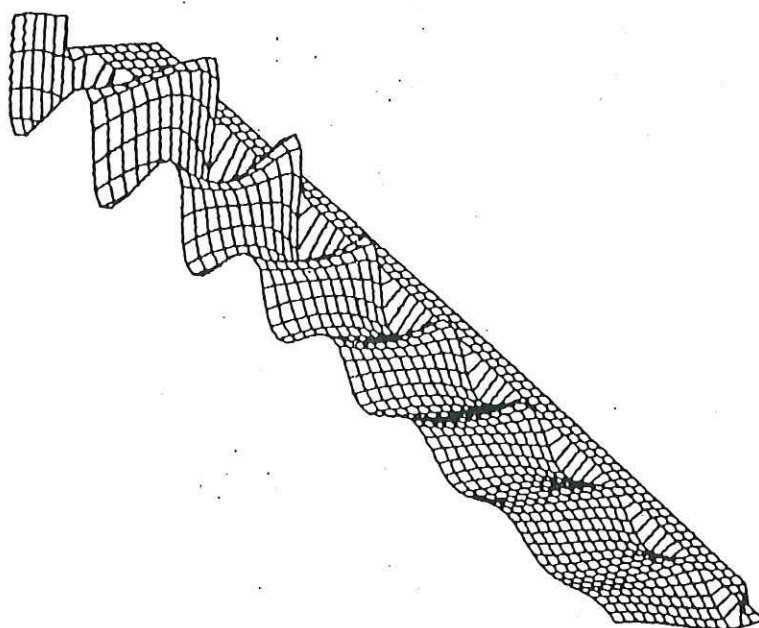


Figura 4. Atenuación del oleaje en el canal de acceso.

En la Figura 5 se presenta una vista tridimensional de detalle de la Dársena A, donde la agitación es mayor. La Figura 6 muestra las líneas de isoamplitud, relativa a la amplitud de la ola incidente, sobre todo el puerto. Dado que el modelo es de tipo lineal, estos resultados son independientes de la amplitud del oleaje incidente.

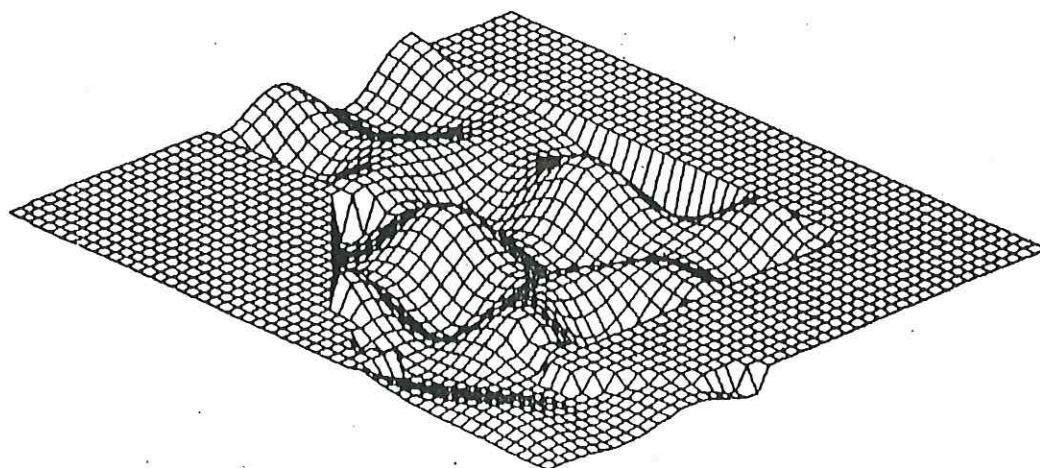


Figura 5. Vista tridimensional del oleaje en la Dársena A.

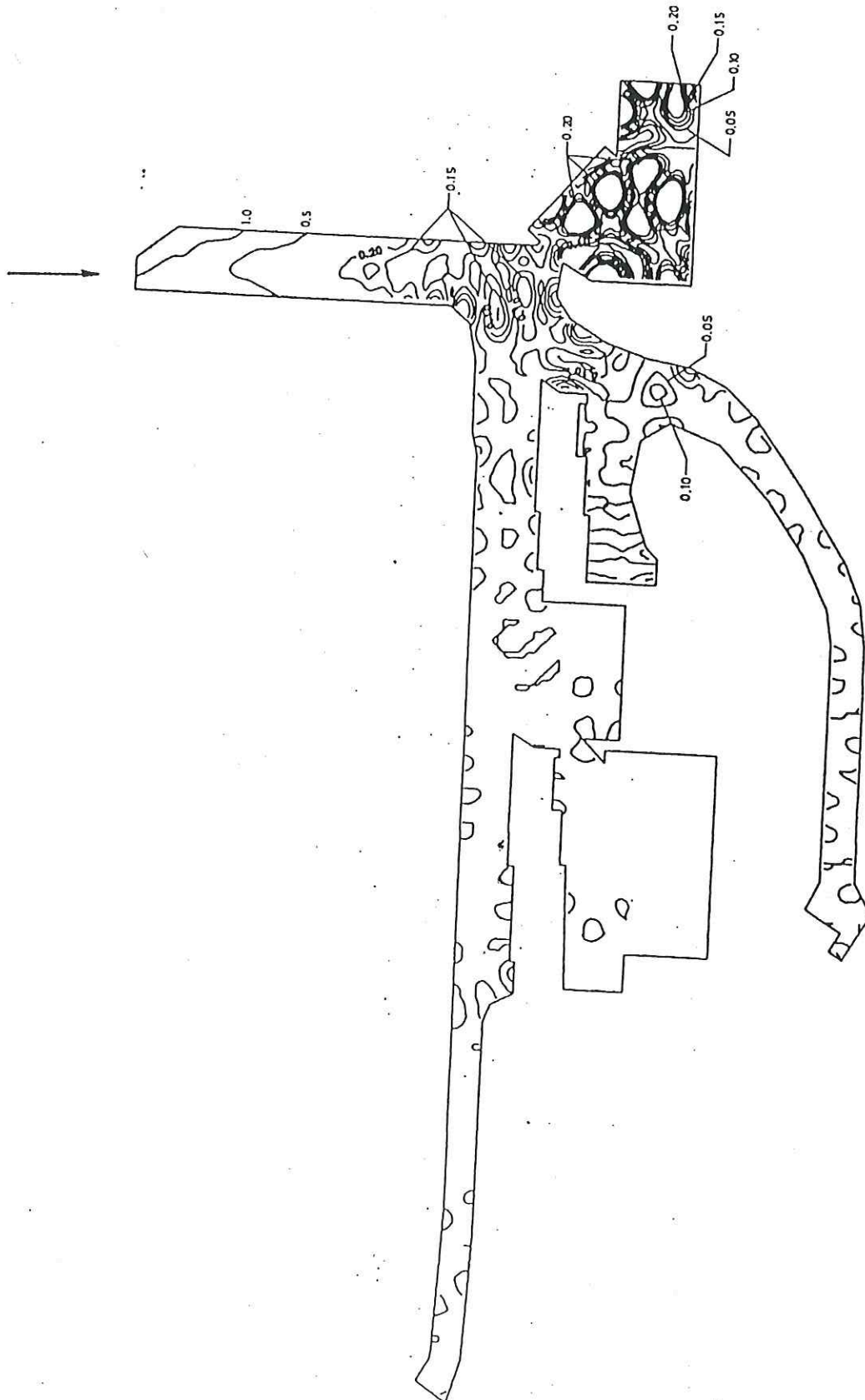


Figura 6. Líneas de isoamplitud.

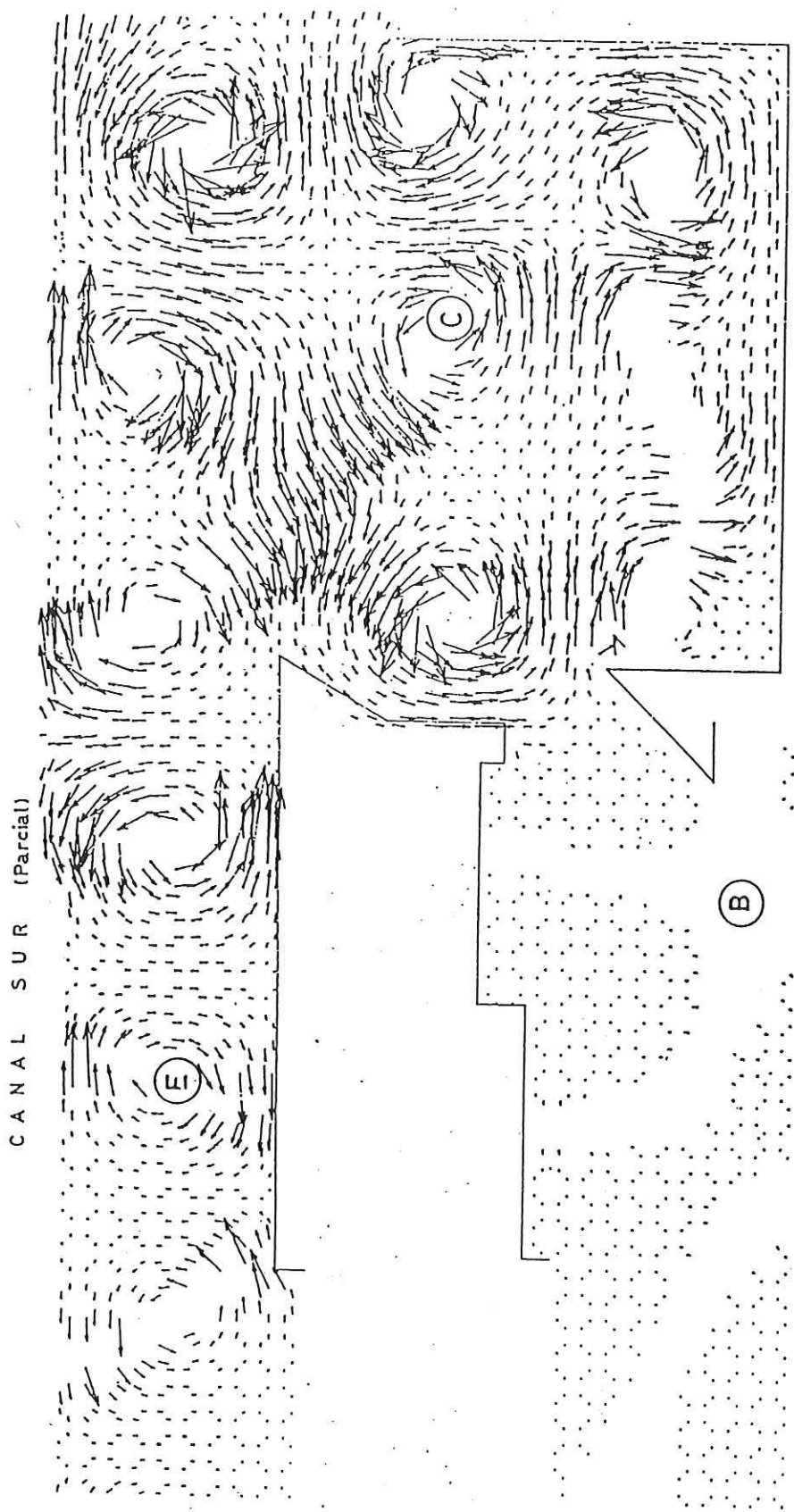


Figura 7. Campo de vectores número de onda.

La dirección de propagación del oleaje dentro de la marina es un parámetro importante de analizar desde el punto de vista práctico, ya que, según cómo estén orientadas las embarcaciones respecto de aquella, las alturas máximas de ola admisible son diferentes. En la Figura 7 la dirección de propagación del oleaje en un sector de la marina se representa mediante el campo de vectores número de onda.

Este fue graficado sólo donde la amplitud relativa supera el 5 %. El módulo de los vectores está escalado respecto del correspondiente a una onda progresiva del mismo período. En la zona B se observa que los vectores número de onda son muy pequeños, lo cual corresponde a un sistema de ondas estacionarias. En las zonas C y E se distingue la presencia de puntos anfodrómicos, alrededor de los cuales giran los frentes de onda (normales al vector número de onda local).

Como todo sistema físico sometido a oscilaciones forzadas, los puertos pueden estar sujetos a fenómenos de resonancia<sup>7</sup>. Por ello, es importante analizar la agitación para todo el rango de períodos de olas factibles de existir. Se efectuaron una larga serie de ensayos para períodos comprendidos entre 9 y 60 segundos, con incrementos de entre 1 y 2 segundos, determinándose, en cada ensayo, la máxima amplitud en cada zona del puerto. En la Figura 8 se muestra el comportamiento de las Dársenas A y D. Se observa que la dársena A presenta varios picos, dos de ellos de relativa importancia. En particular, se ve que para un período de 9 segundos hay un pico secundario que prácticamente duplica la amplitud respecto de otras dársenas. Esta es, precisamente, la condición que corresponde a la vista tridimensional presentada en la Figura 3.

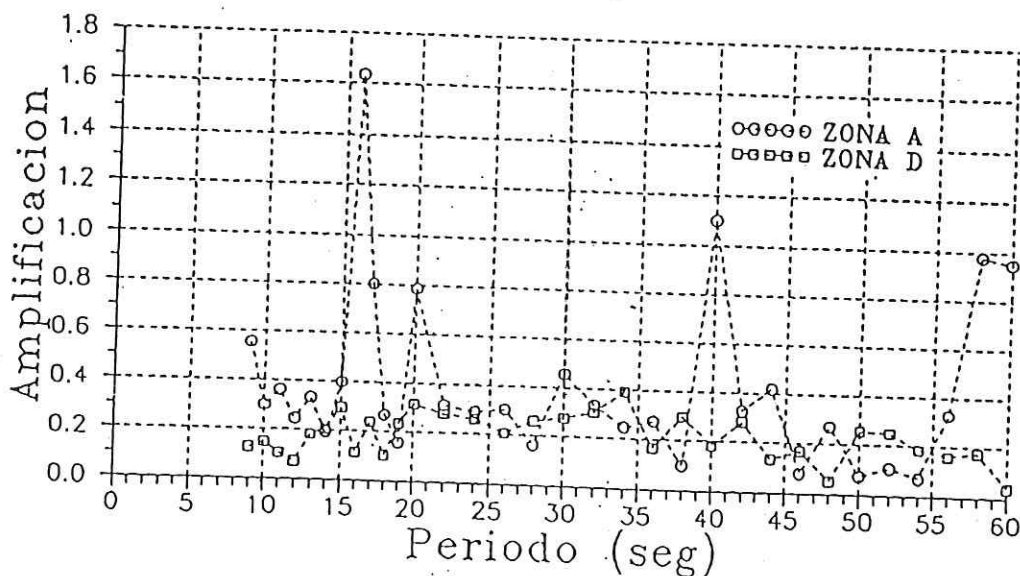


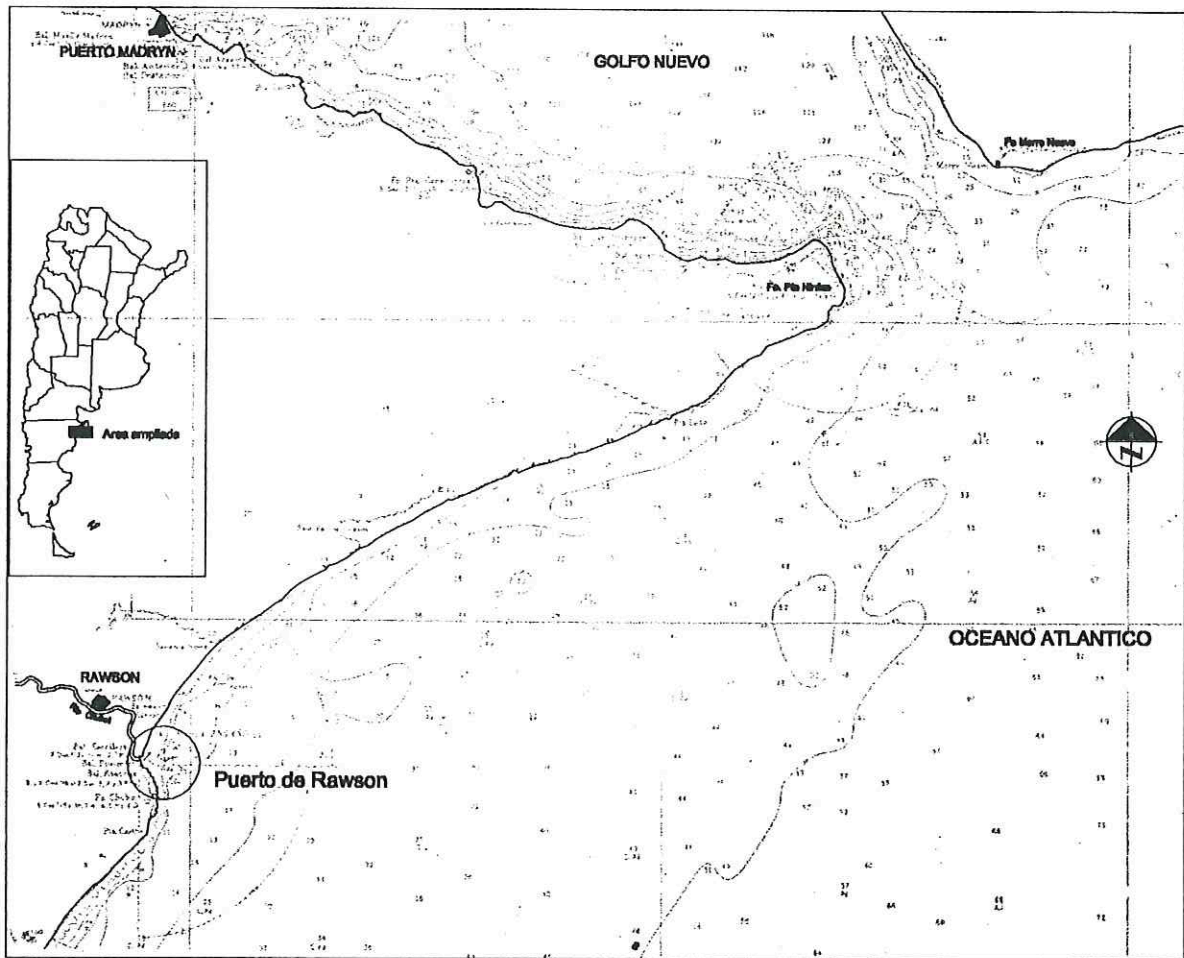
Figura 8. Curva de Resonancia.

## CONCLUSIONES

A través de la presentación de una aplicación, se ha ilustrado el alcance práctico de los resultados obtenidos con un modelo numérico de agitación por oleaje en el interior de un puerto desarrollado en el LHA. El estudio requirió de una estrecha colaboración entre los encargados del proyecto de la obra y los responsables del desarrollo y la operación del modelo, lo cual se tradujo en un pleno aprovechamiento de los resultados obtenidos.

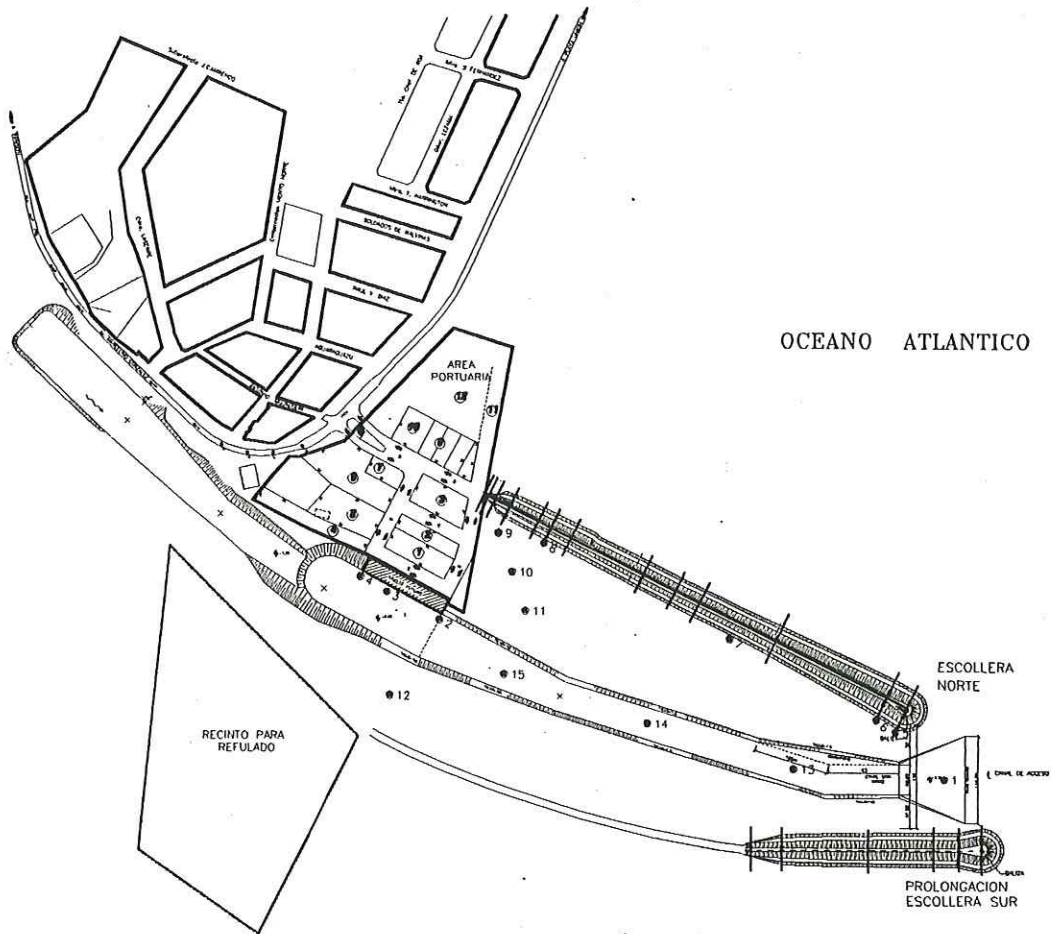
## REFERENCIAS

1. C.A. Vionnet y A.N. Menéndez, "Difracción-Refracción combinadas de ondas de agua. Cálculo utilizando elementos finitos híbridos, incluyendo bordes absorbentes y disipación por fricción", *ENIEF'87*, San Carlos de Bariloche, (1987).
2. C.A. Vionnet, "Difracción-Refracción combinadas en ondas de agua", *Informe LHA-INCyTH 064-02-87*, (1987).
3. J.C.W. Berkhoff, "Computation of combined refraction-diffraction", *Proc. 13th. Conf. on Coastal Engineering*, Vancouver, (1972).
4. J.C.W. Berkhoff, N. Booij y A.C. Radder, "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear waves", *Coastal Engineering 6*, Elsevier Publishers, pp. 255-279, Amsterdam, (1982).
5. N. Booij, "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", *Report No. 81-1*, Delft University of Technology, (1982).
6. M.A. Cavaliere, R. Castellano y A.N. Menéndez, "Estudio de las condiciones de agitación en la marina de Punta del Este. Informe de avance No. 1", *Informe LHA-INCyTH 112-01-90*, (1990).
7. C.A. Vionnet, "Resonancia de puertos inducida por ondas gravitatorias", *Informe INCyTH 064-05-88*, (1988).



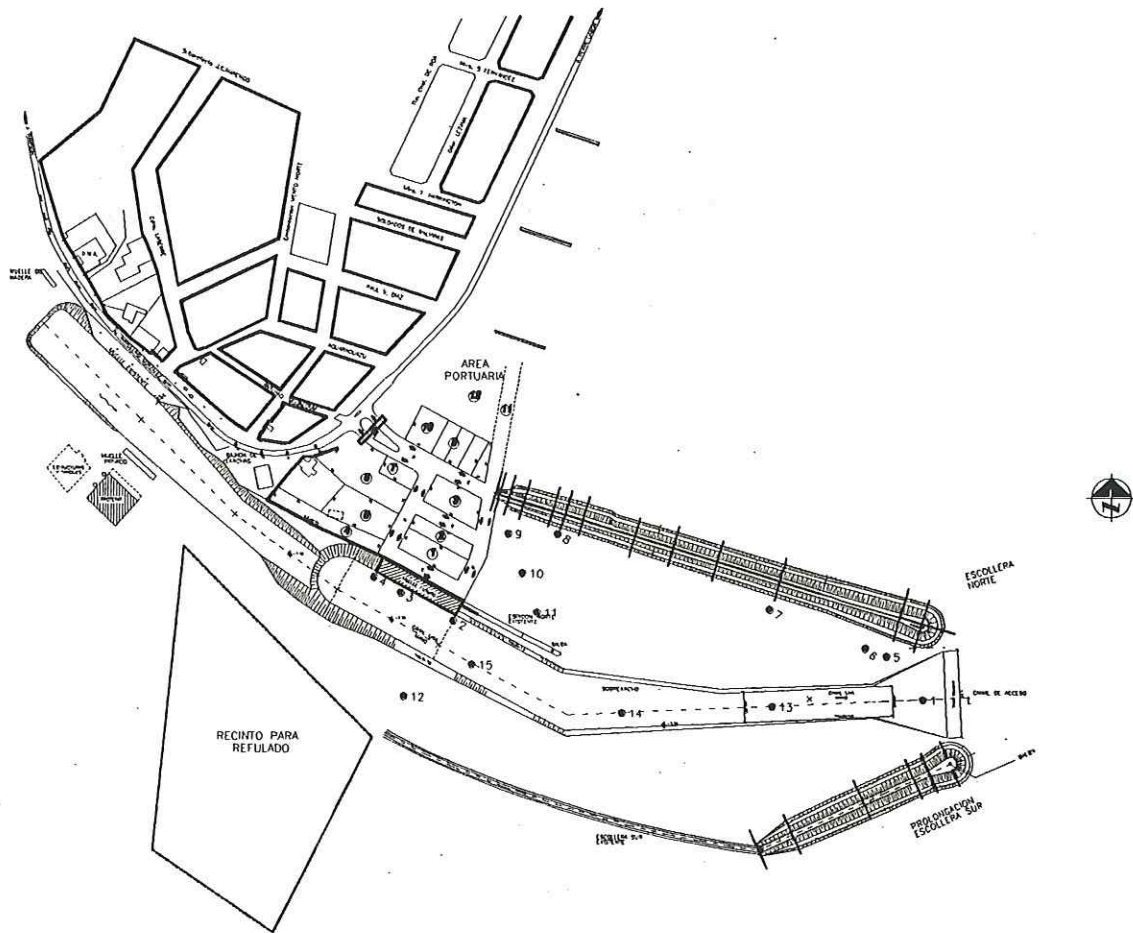
**Puerto de Rawson - Plano de Ubicación**

**Figura 1**



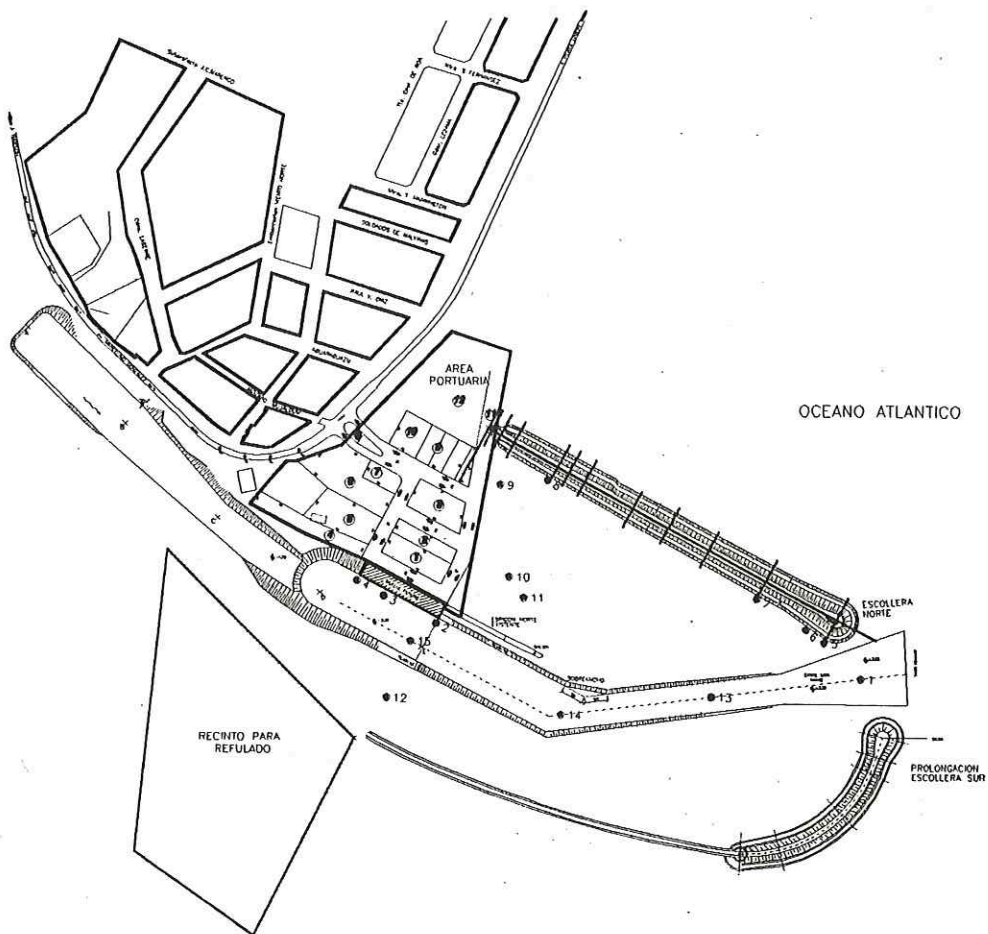
Planta Portuaria - Preliminar 1

Figura 2



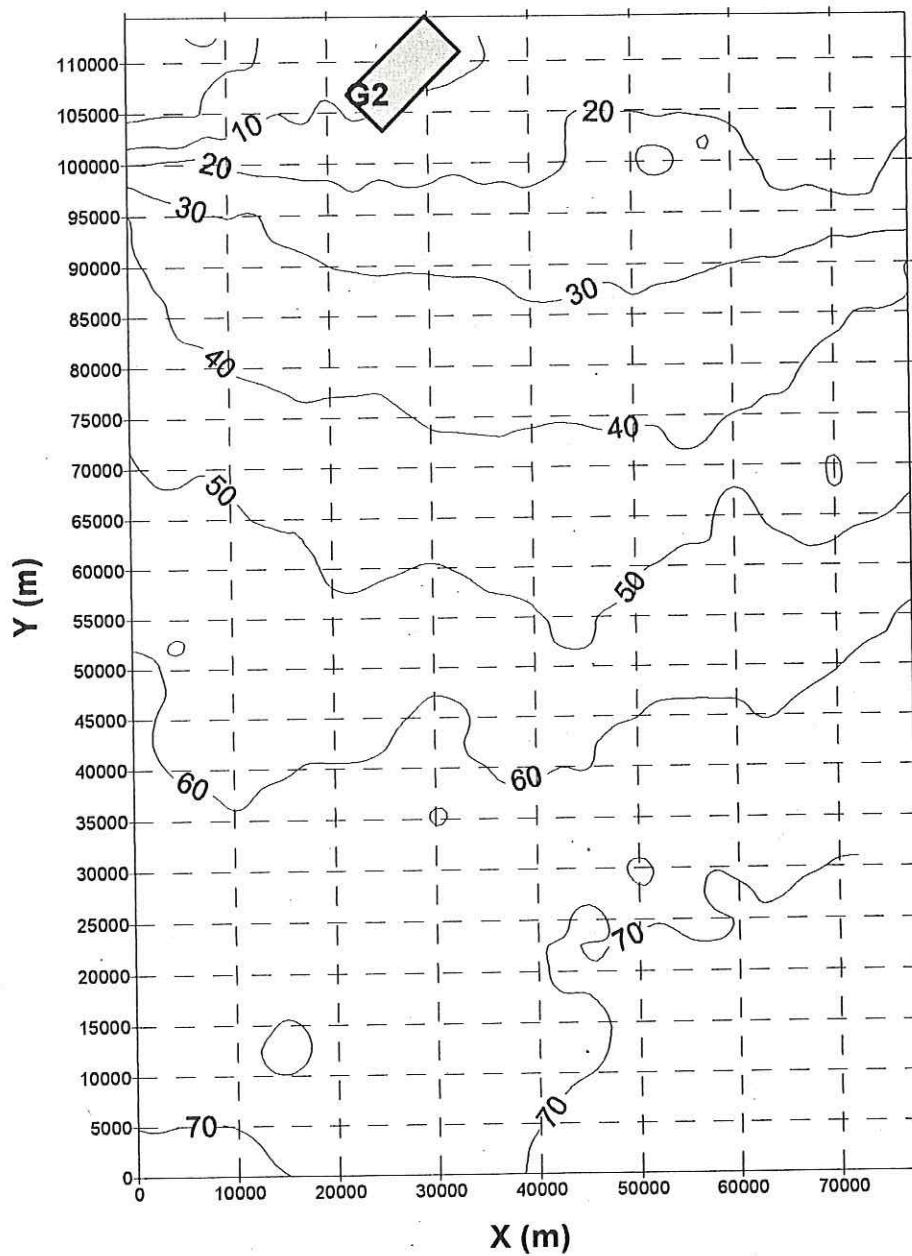
Planta Portuaria - Preliminar 3

Figura 3



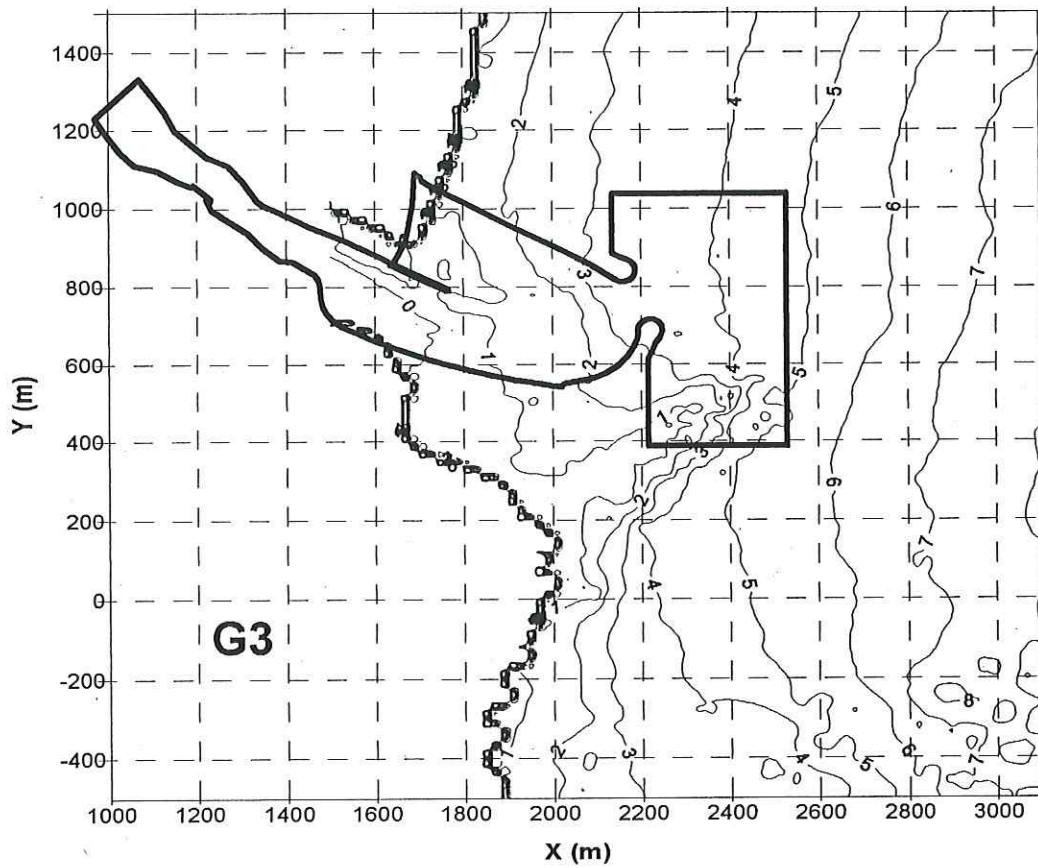
Planta Portuaria - Preliminar 4

Figura 4



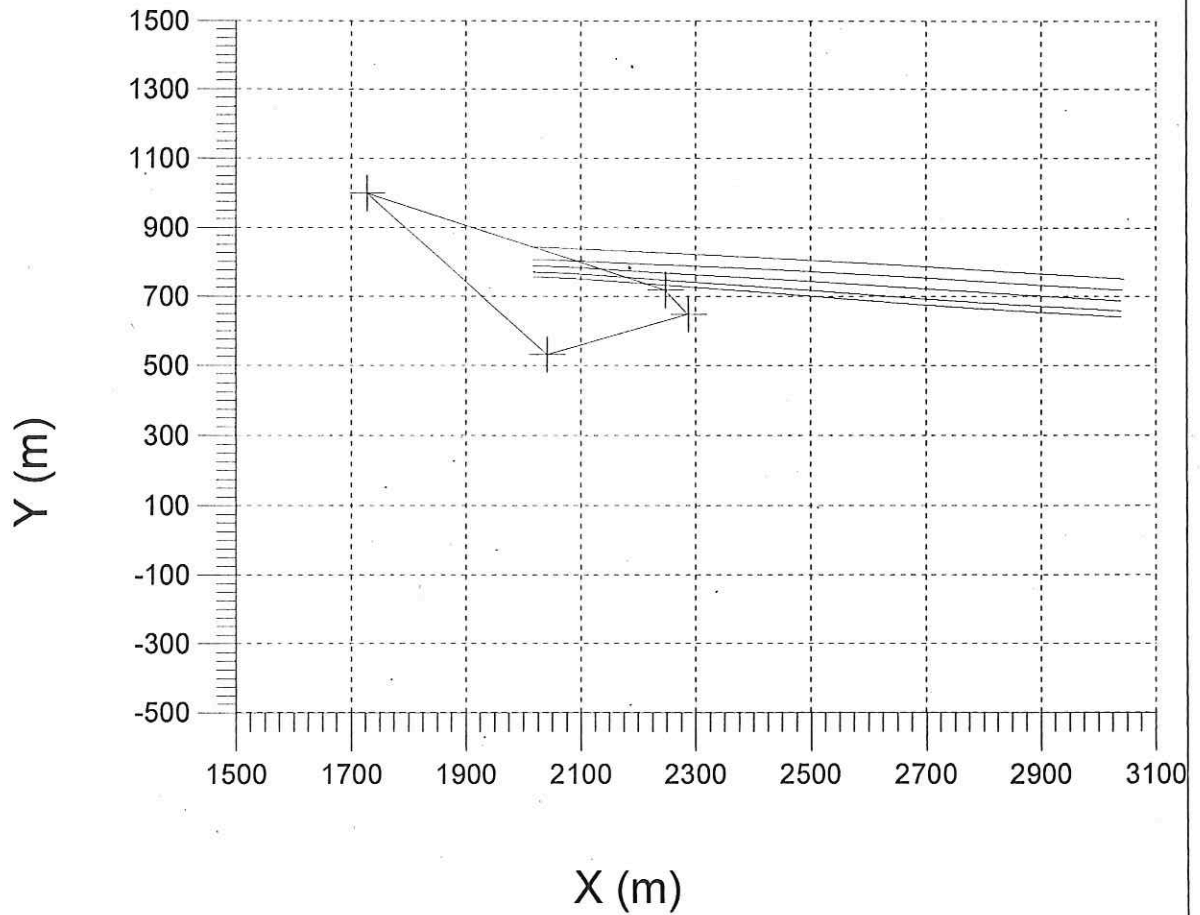
Grillas de Cálculo de Refracción de Olas

Figura 5



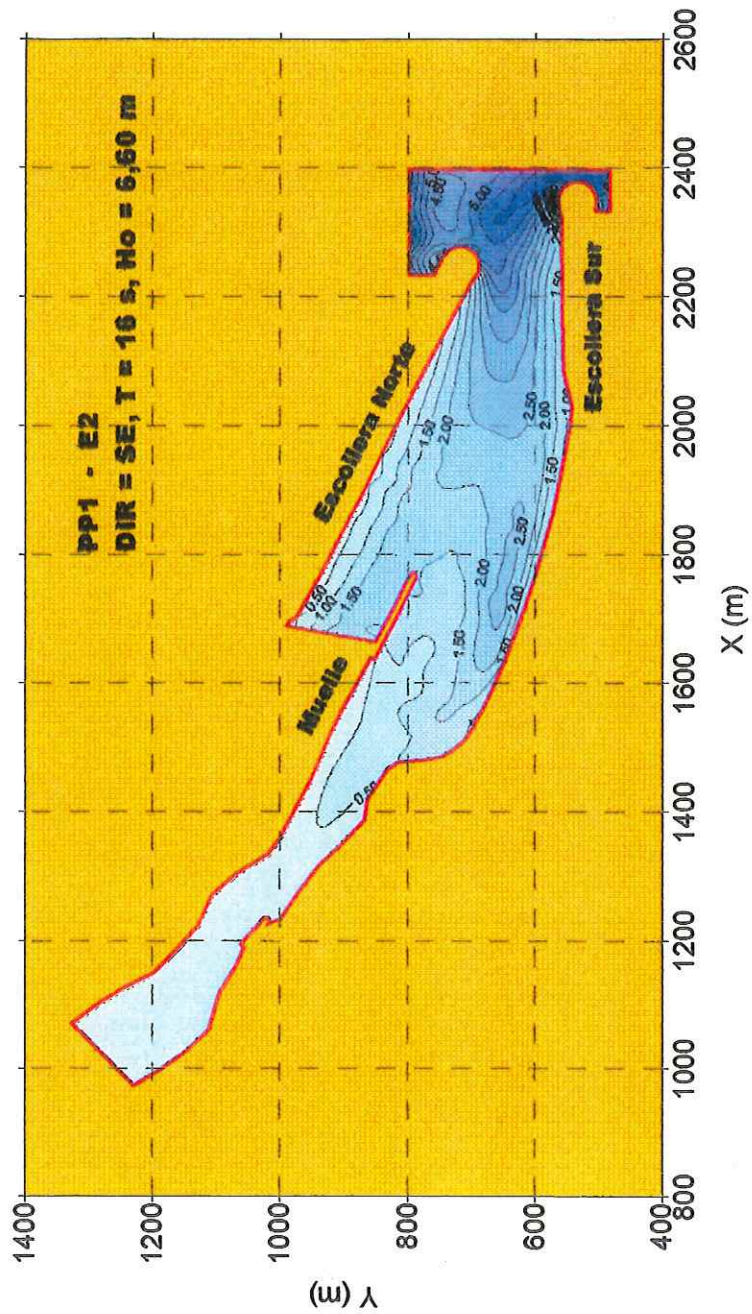
Grilla 3

Figura 6



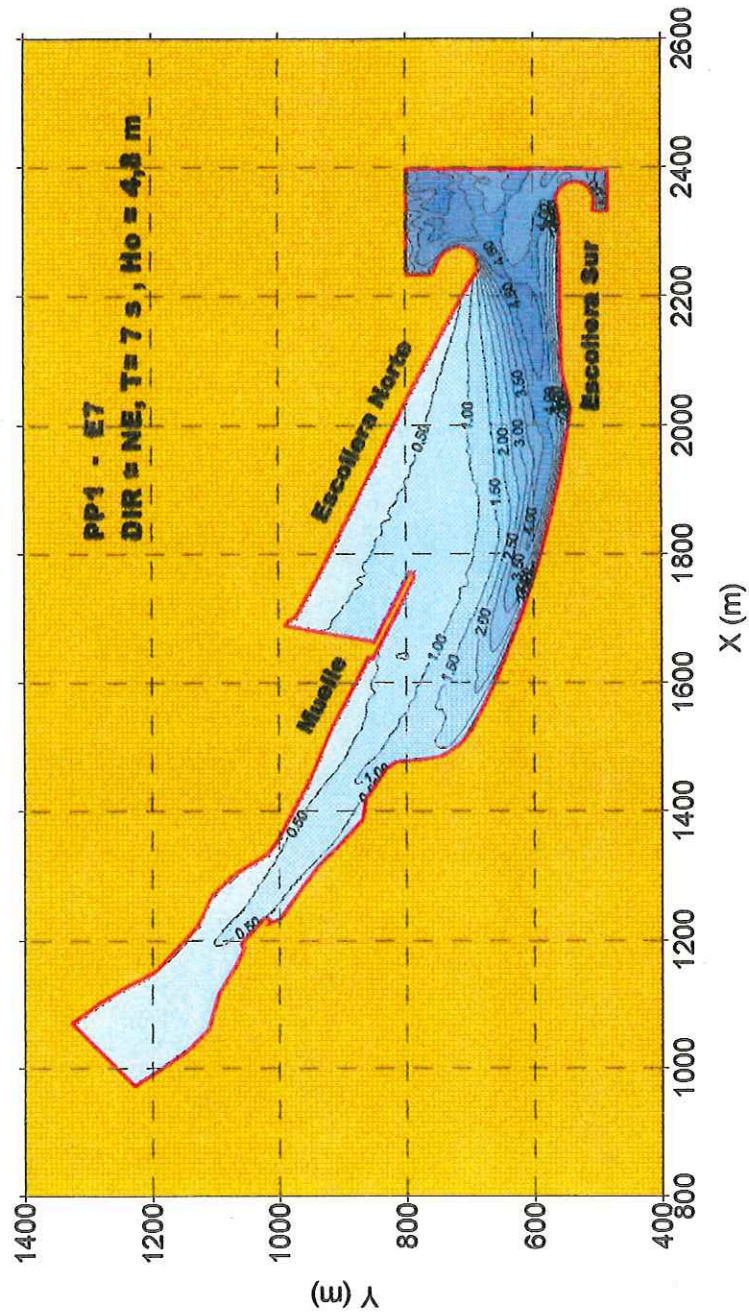
Refracción de Olas en Grilla 3

Figura 7



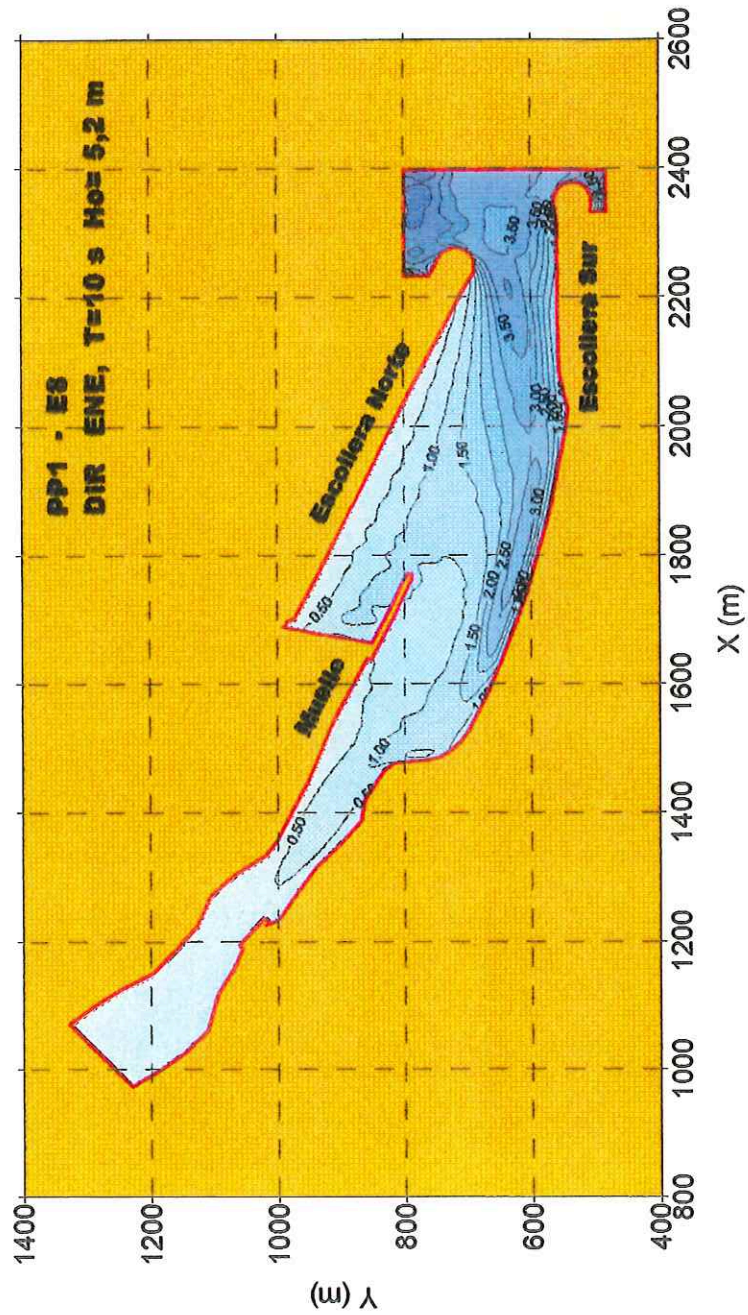
Proyecto Preliminar 1. Escenario 2

Figura 8



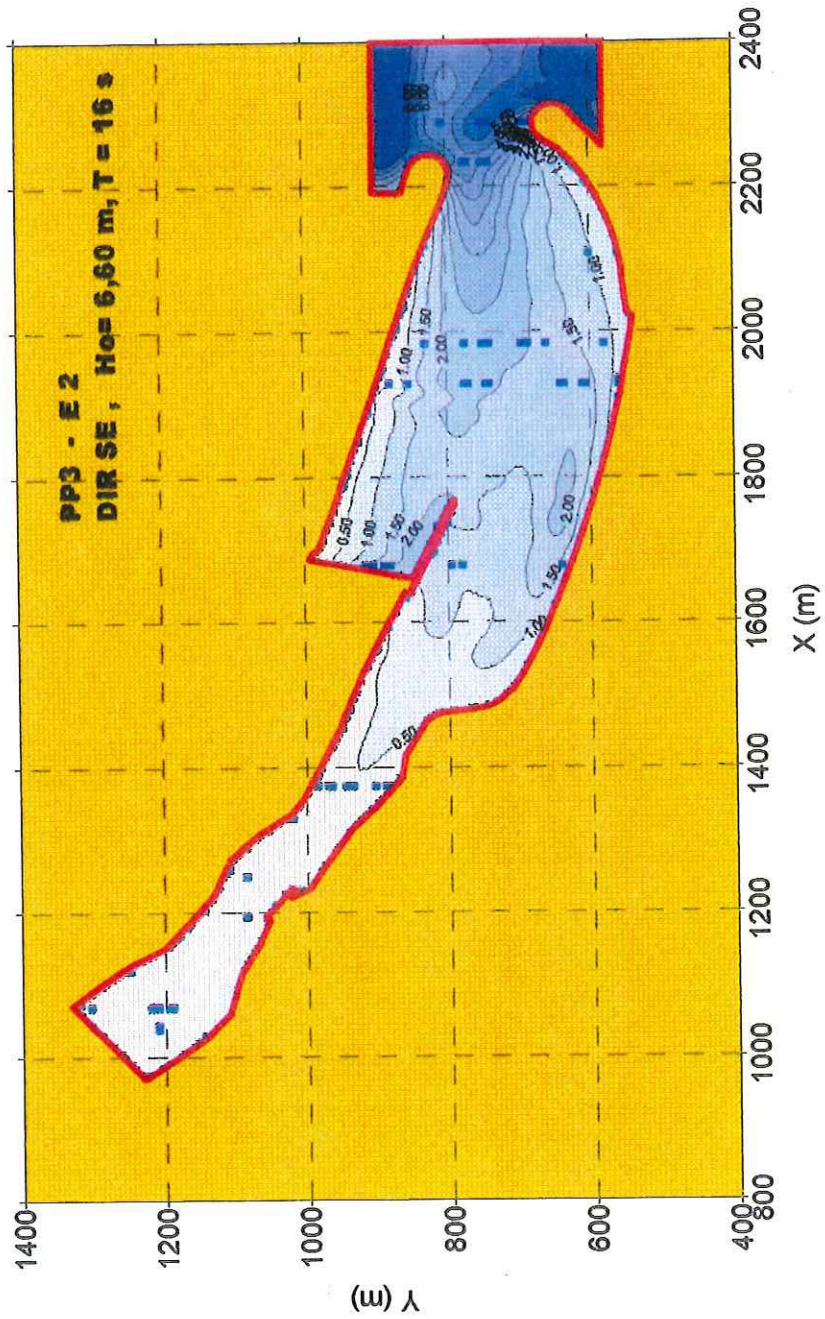
Proyecto Preliminar 1. Escenario 7

Figura 9



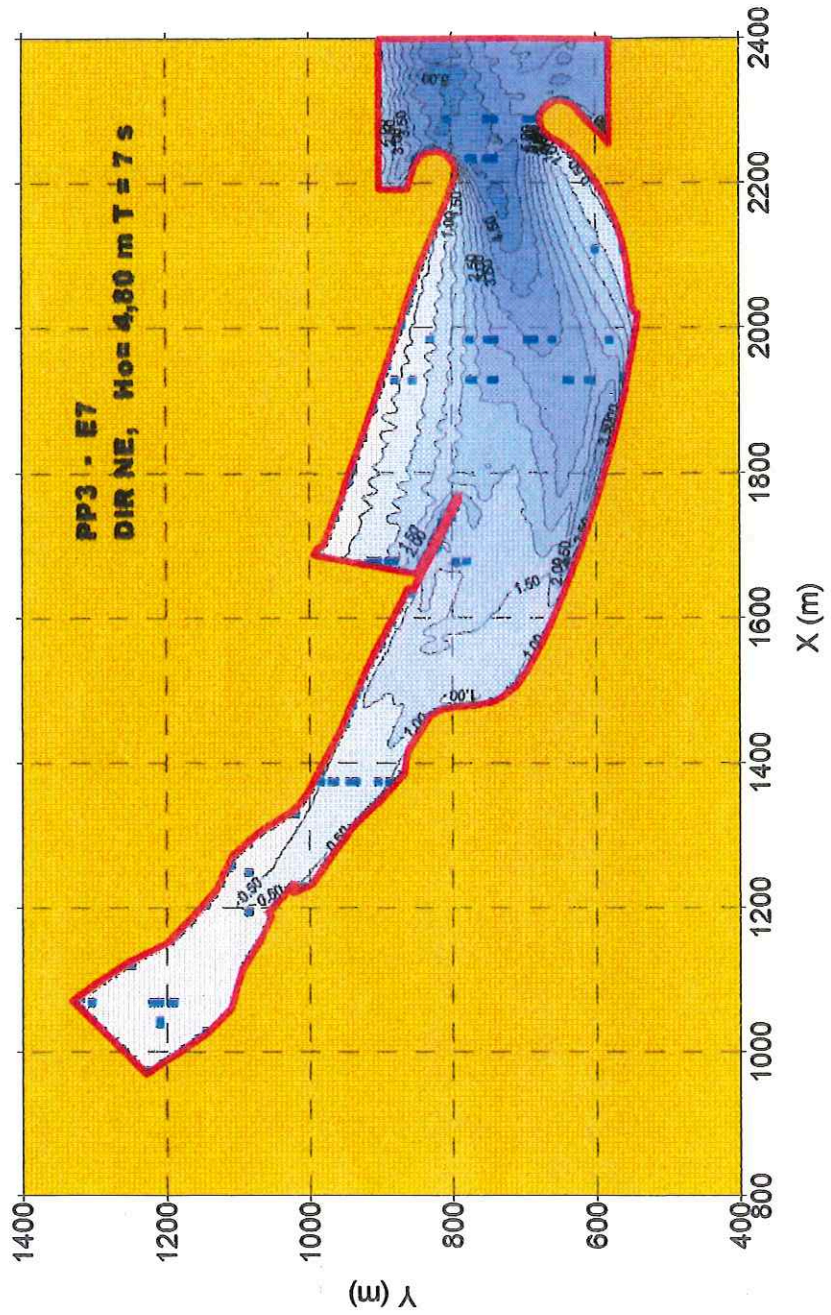
Proyecto Preliminar 1. Escenario 8

Figura 10



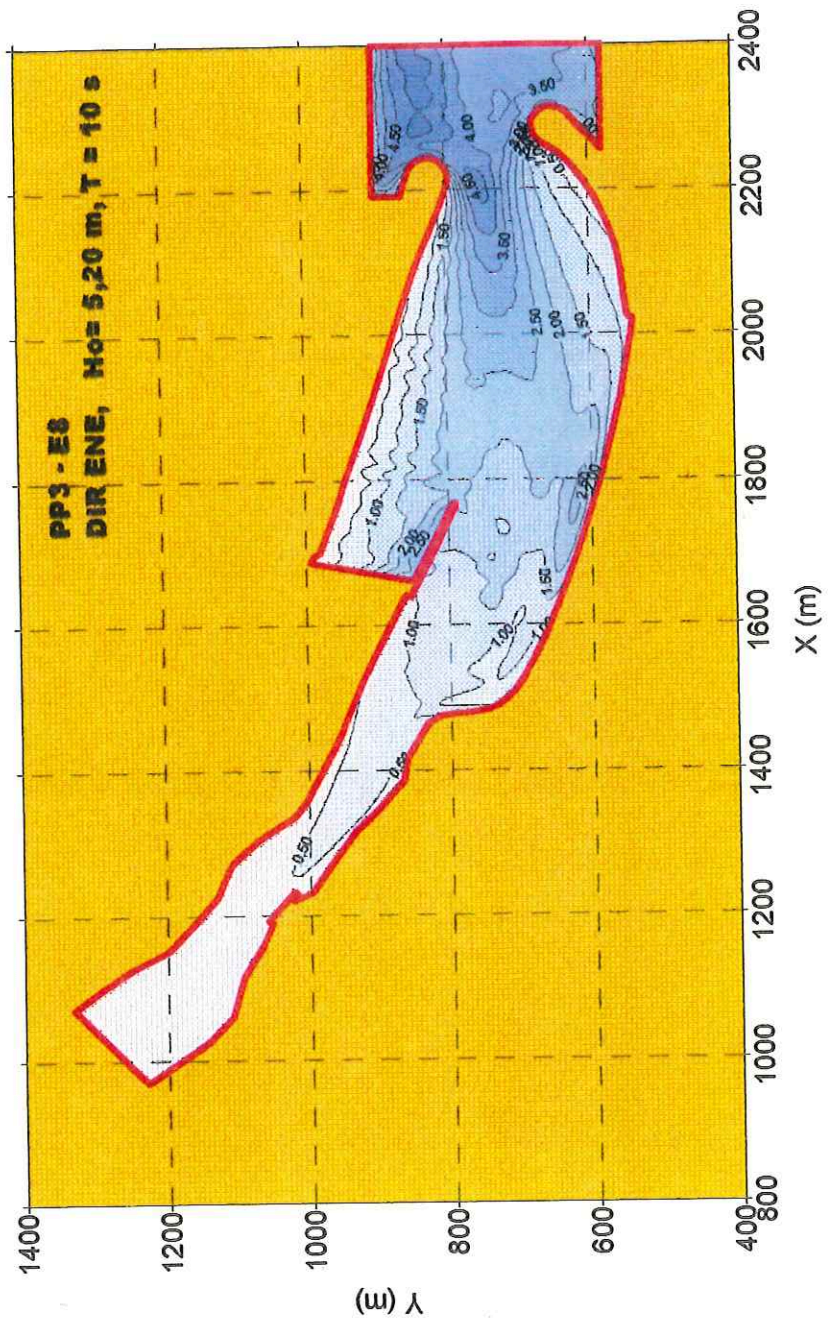
Proyecto Preliminar 3. Escenario 2

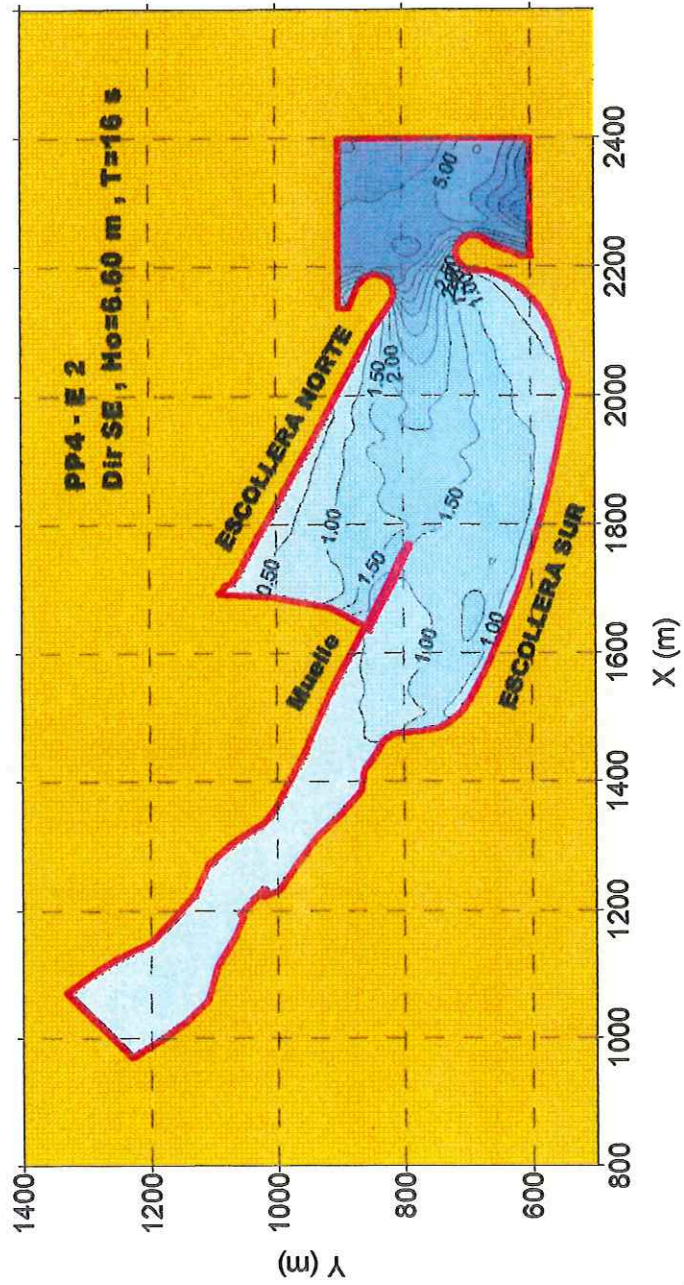
Figura 11



Proyecto Preliminar 3. Escenario 7

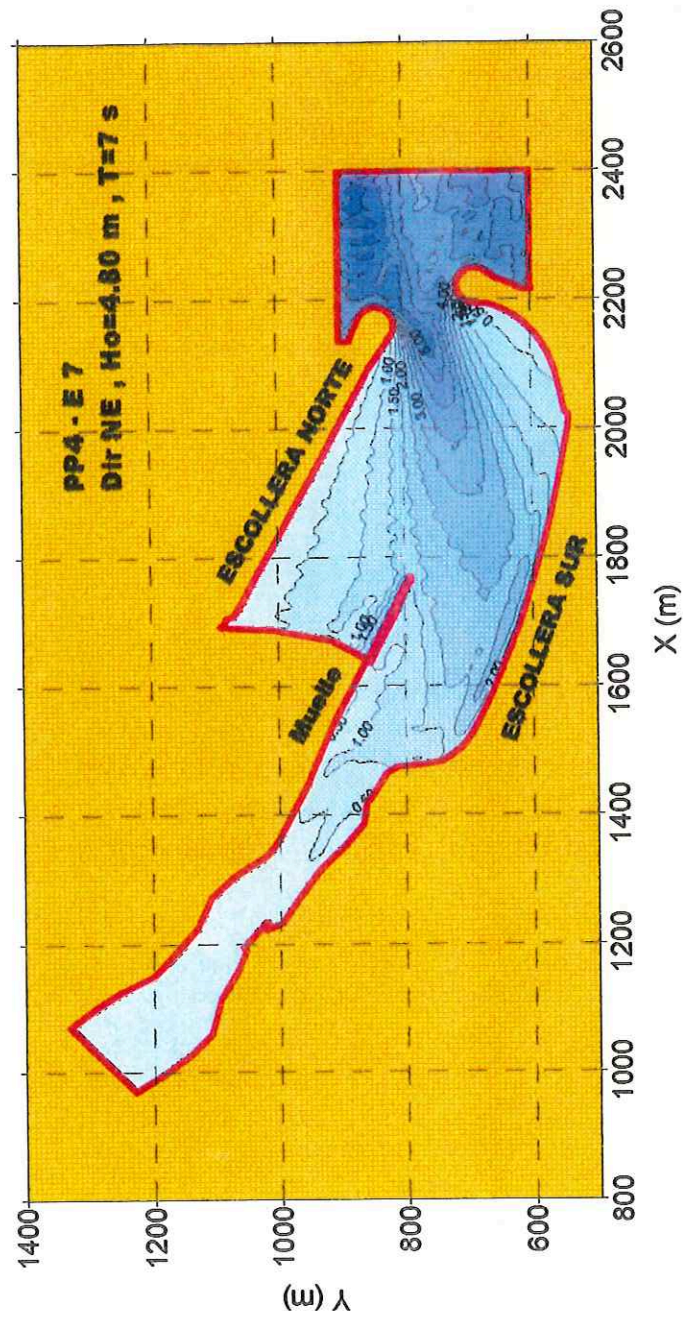
Figura 12





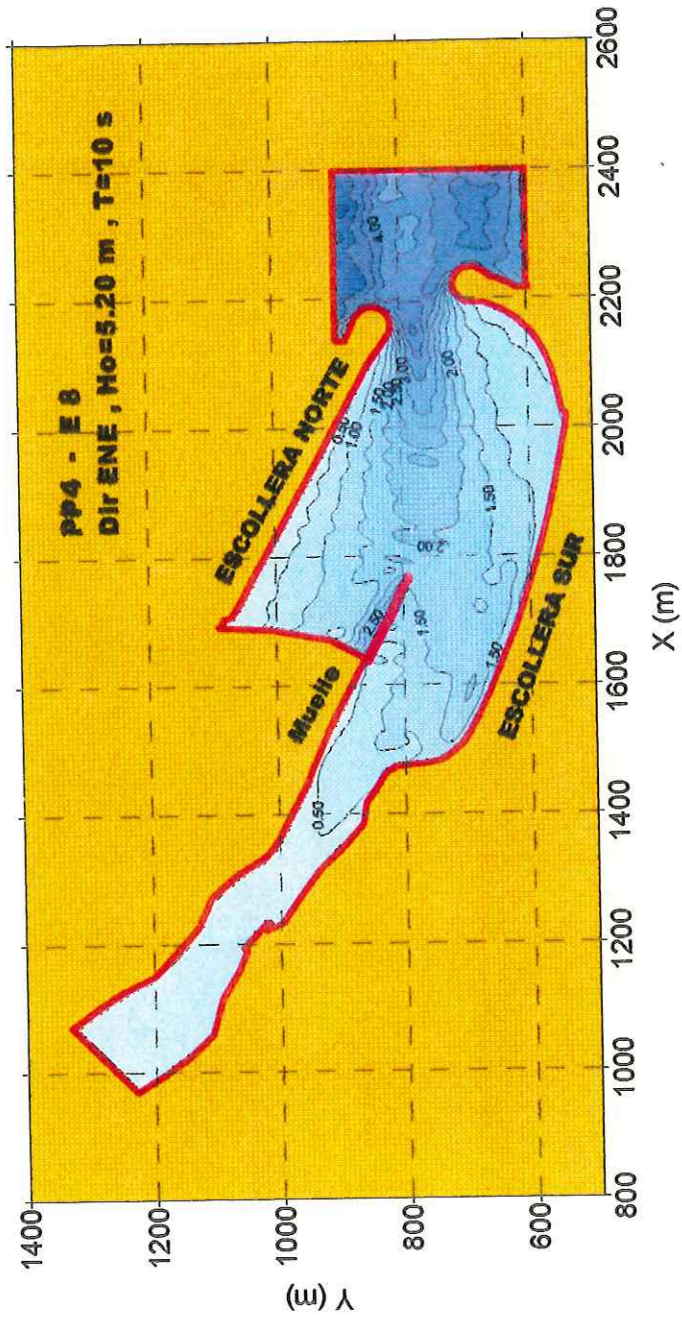
Proyecto Preliminar 4. Escenario 2

Figura 14



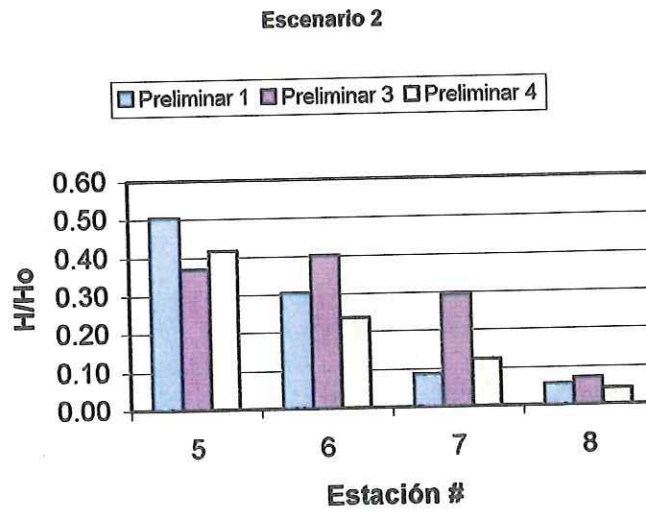
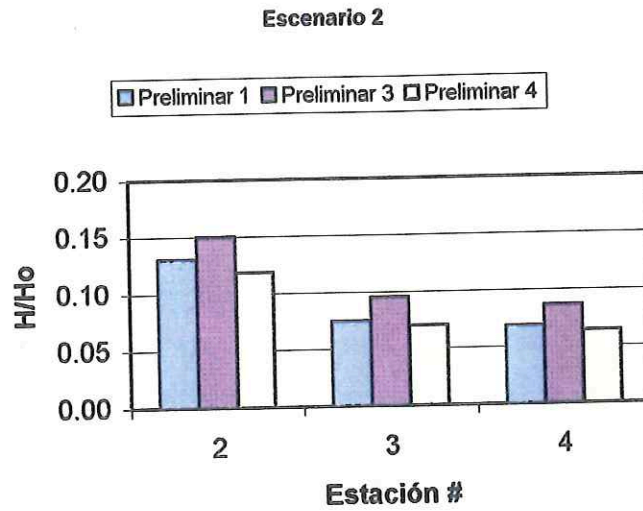
Proyecto Preliminar 4. Escenario 7

Figura 15



Proyecto Preliminar 4. Escenario 8

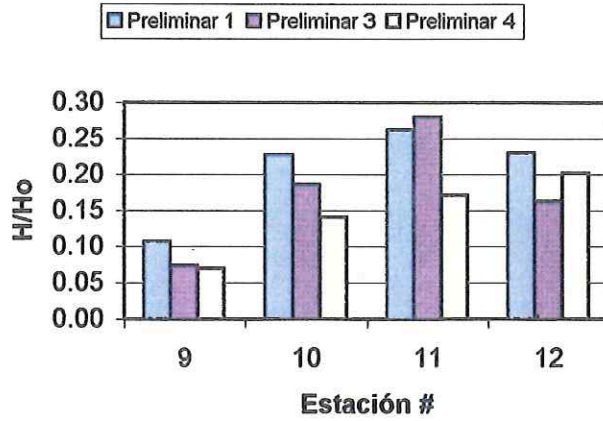
Figura 16



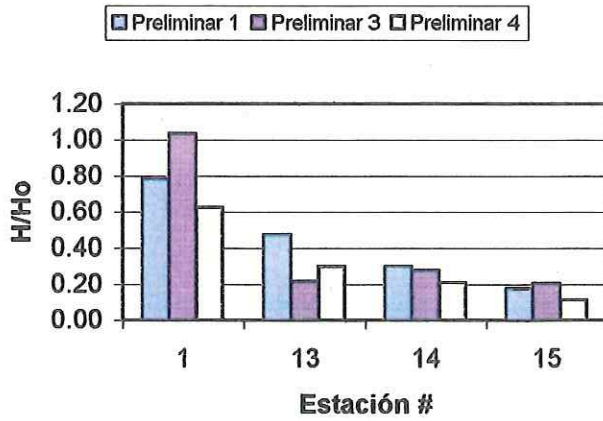
**Comparación de Coeficientes de Transformación  
Escenario 2**

**Figura 17**

**Escenario 2**

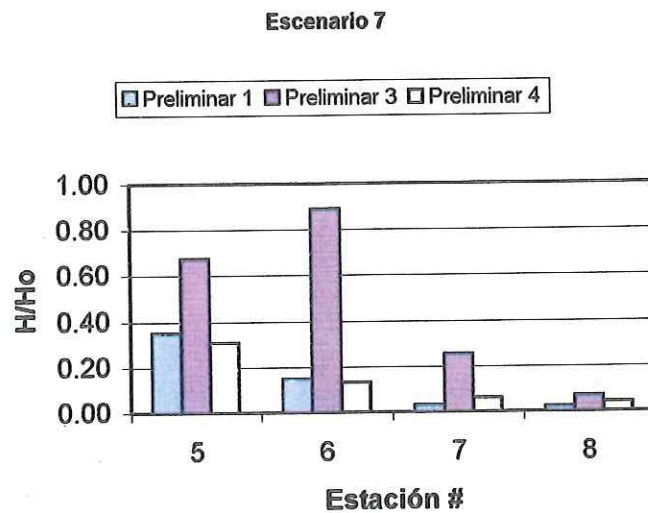
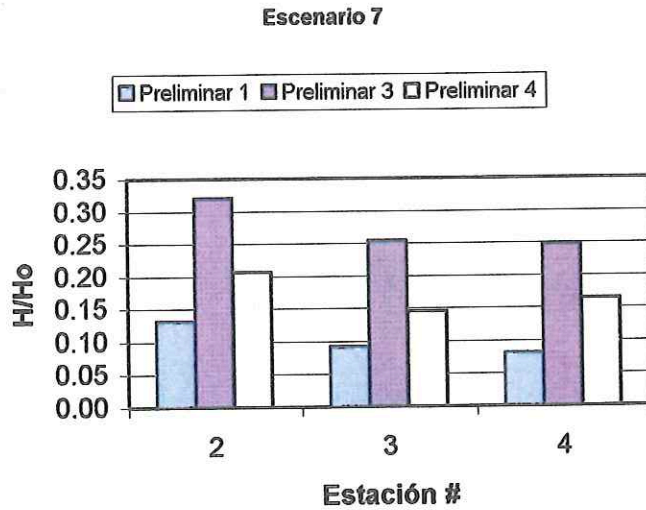


**Escenario 2**



**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 2**

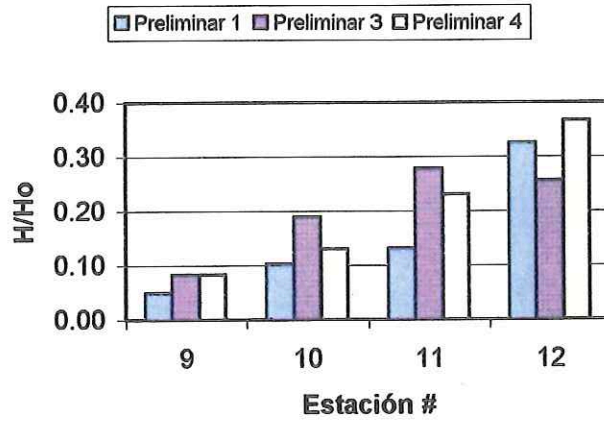
**Figura 18**



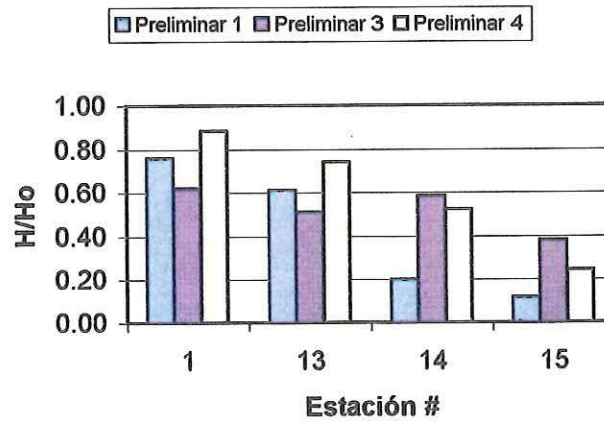
**Comparación de Coeficientes de Transformación  
Escenario 7**

**Figura 19**

**Escenario 7**



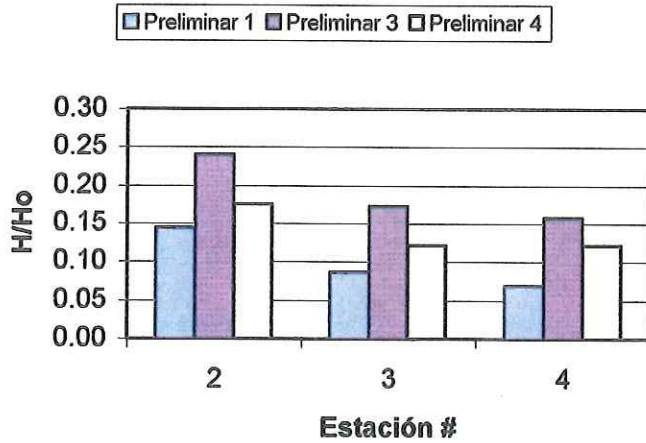
**Escenario 7**



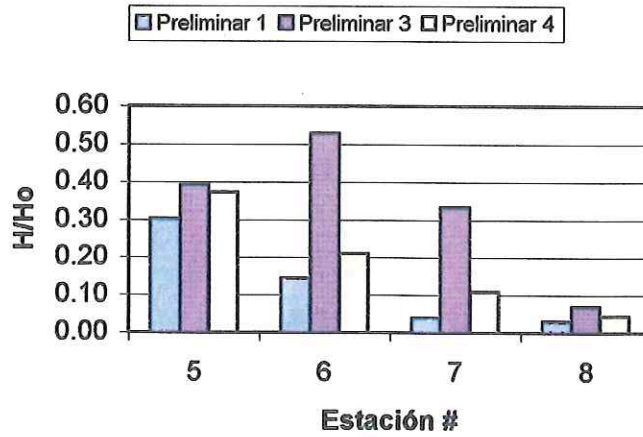
**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 7**

**Figura 20**

**Escenario 8**



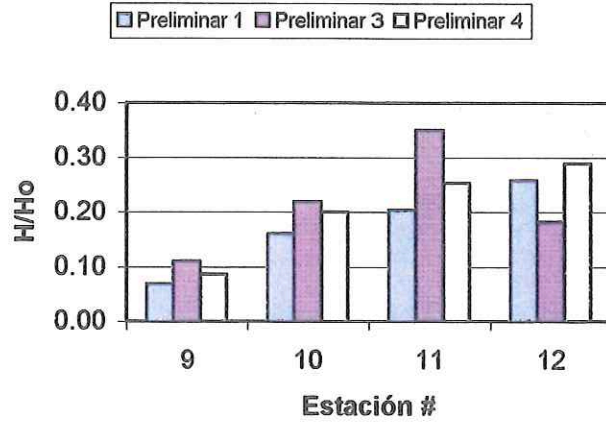
**Escenario 8**



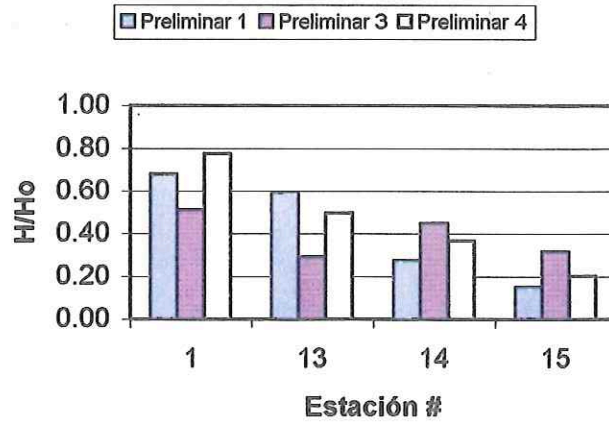
**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 8**

**Figura 21**

Escenario 8



Escenario 8



**Comparación de Coeficientes de Transformación**  
**Escenario 8**

**Figura 22**

# FOTOGRAFIAS



**Fotografía 2**



**Fotografía 4**



**Fotografía 5**



**Fotografía 6**



**Fotografía 7**



**Fotografía 8**

# ANEXO I

# ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AGITACION POR OLEAJE EN UN PUERTO MEDIANTE SIMULACION NUMERICA

MIGUEL A. CAVALIERE  
ANGEL N. MENENDEZ  
y  
ROBERTO CASTELLANO

*Laboratorio de Hidráulica Aplicada - I.N.C. y T.H.,  
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto de Ezeiza,  
Argentina.*

## RESUMEN

Se describe una aplicación del sistema computacional DIFRAC para estudiar las condiciones de agitación por oleaje dentro de un puerto, teniendo en cuenta el efecto combinado de difracción, refracción y reflexión de las olas. Se presentan resultados para la amplitud y dirección de propagación del oleaje en su interior y de las condiciones de resonancia en las distintas dársenas del puerto.

## SUMMARY

An application of the computational model DIFRAC for the study of wave conditions inside a harbor is described. It takes account of the combined effect of diffraction, refraction and reflection of waves. Results for wave amplitude and wave front propagation direction into the harbor are presented, together with an analysis of resonance conditions for the different docks.

## INTRODUCCION

Un puerto constituye un área de aguas calmas no sólo para garantizar la permanencia en amarra de las embarcaciones bajo adecuadas condiciones de seguridad, sino además para permitir las operaciones que éstas deban realizar: embarque de pasajeros, manipuleo de cargas, abastecimiento, reparación, mantenimiento, etc.

En zonas expuestas a la acción del oleaje, es habitual que se deba recurrir a la construcción de estructuras de protección que limiten su penetración al puerto. Las dimensiones y orientación del acceso al puerto surgen de una solución de compromiso entre las facilidades requeridas por las embarcaciones para acceder al puerto y la energía de oleaje máxima admisible dentro del espejo de agua protegido. La construcción de

Recibido: Noviembre 1991

estas estructuras (obras de abrigo) tiene, habitualmente, una importante incidencia en el costo total del puerto, afectando la rentabilidad en el caso de tratarse de un puerto comercial. Proteger en exceso supone inversiones iniciales innecesariamente altas; por el contrario, proteger en defecto significa costos operativos elevados.

Para la depuración de un proyecto portuario, específicamente en lo que se refiere a protección del oleaje, el ingeniero hidráulico ha recurrido tradicionalmente a los modelos hidráulicos, es decir, a la simulación física del problema en escala reducida. Mediante esta técnica el ingeniero proyectista tiene la posibilidad de "ver" cómo las obras interactúan con el oleaje, facilitándole la interpretación de la compleja hidrodinámica, originada en la coexistencia de los fenómenos de difracción, refracción y reflexión, y la formulación de diagnósticos y propuestas de soluciones. La principal dificultad con la simulación física es su alto costo en infraestructura (superficies cubiertas del orden de 500 a 1000 m<sup>2</sup>, equipo para generación de olas, instrumentación electrónica específica para la adquisición de datos), implementación (costo de construcción) y operación (energía eléctrica, personal auxiliar). Además, para escalas del orden de 1:150 a 1:200 los efectos de escala comienzan a distorsionar los resultados.

Estos inconvenientes, sumados a la reciente formulación de modelos teóricos confiables de agitación por oleaje, el persistente incremento de la potencia de cálculo de las computadoras, a costos cada vez menores, y los avances en los métodos de resolución numérica de ecuaciones diferenciales y de las técnicas de visualización de resultados, han colocado a la simulación numérica en una posición ventajosa tanto desde el punto de vista técnico como económico.

En este trabajo se presenta un estudio de las condiciones de agitación por oleaje en un puerto deportivo a construirse en Punta del Este (Uruguay). El objetivo es ilustrar el alcance de este tipo de modelos desde un punto de vista práctico.

## MODELO NUMÉRICO

El estudio se realizó con el sistema computacional DIFRAC, desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA) del INCYTH. Este modelo permite simular el efecto combinado de refracción, difracción y reflexión de olas, tal como se presenta en los recintos portuarios. Sus detalles técnicos ya han sido expuestos en oportunidades anteriores<sup>1,2</sup>. En lo que sigue se presenta sólo una breve reseña.

La formulación matemática del problema de agitación se basa en la teoría lineal de ondas de pequeña amplitud de tipo armónico y en la hipótesis de que la pendiente del fondo es suave<sup>3</sup>. Bajo esas condiciones, el potencial (complejo) plano de velocidades  $\Phi$ , reducido al nivel medio del agua, satisface la ecuación

$$\nabla \cdot (\alpha \nabla \Phi) + \mathcal{K}^2 \alpha \Phi = 0 \quad (1)$$

donde  $\alpha$  es el producto de las celeridades de fase y de grupo y  $\mathcal{K}$  un coeficiente de modulación vertical de la amplitud de oscilación, relacionado a la frecuencia mediante una relación de dispersión.

La amplitud  $A$  del oleaje puede calcularse a partir del potencial plano reducido a través de la siguiente expresión:

$$A = \frac{\omega}{g} |\Phi| \quad (2)$$

donde  $\omega$  es la pulsación de la ola y  $g$  la aceleración de la gravedad.

La ecuación (1), conocida como Ecuación de Berkhoff, ha sido exhaustivamente verificada en su capacidad de simular adecuadamente el fenómeno de agitación<sup>2,4</sup>. En particular, Booij<sup>5</sup> analizó su comportamiento en problemas con pendientes relativamente fuertes, comparando sus resultados con un modelo tridimensional, y obtuvo acuerdos satisfactorios a pesar de apartarse de una de las hipótesis básicas de la formulación.

Los contornos físicos del recinto portuario pueden comportarse como totalmente reflejantes o parcialmente absorbentes. Estos últimos representan estructuras en las cuales hay disipación de energía, tales como rompeolas, escolleras de enrocado, etc.

El puerto se comunica, a través de su entrada, con el mar, que constituye un dominio "infinito" donde se superponen el oleaje incidente y el de "scattering", resultante de la acción reflejante y difractante del conjunto de estructuras que componen el puerto. El potencial de "scattering" debe satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld.

Con vistas a su resolución numérica, el dominio del problema es dividido en una región interior finita, donde se concentran todos los contornos físicos relevantes, y una región exterior infinita. En la primera es posible reemplazar la formulación diferencial por una variacional. Para la región exterior, en cambio, puede adoptarse una formulación integral indirecta en términos de una distribución de fuentes, lo cual trae como ventaja la posibilidad de resolver el problema exterior sólo sobre el contorno matemático de separación de ambas regiones, denominado frontera de radiación.

En base a esta reformulación del problema, es natural adoptar el método de los elementos finitos para la zona interior y el método de los elementos de contorno para la zona exterior.

## DESCRIPCION DEL PUERTO

El proyecto estudiado corresponde a una marina a construirse, sobre el litoral atlántico de la República Oriental del Uruguay, destinada al amarre de embarcaciones deportivas. Este estudio fue efectuado por la LHA a requerimiento de la consultora LATINOCONSULT S.A.<sup>6</sup>.

En la Figura 1 se presenta un esquema del puerto y se identifican distintas zonas. El acceso desde el mar se logra a través de un canal de navegación de aproximadamente 300 metros de longitud, a cuyos lados se desarrollan dos escolleras de enrocado. La distribución general de las zonas de amarra es de tipo ramificada, distinguiéndose cuatro dársenas (A,B,C,D) y dos canales (zonas E a I). La profundidad en toda la marina es constante, salvo en el canal de acceso. La sección transversal del canal es de tipo trapezoidal, con taludes laterales suaves.

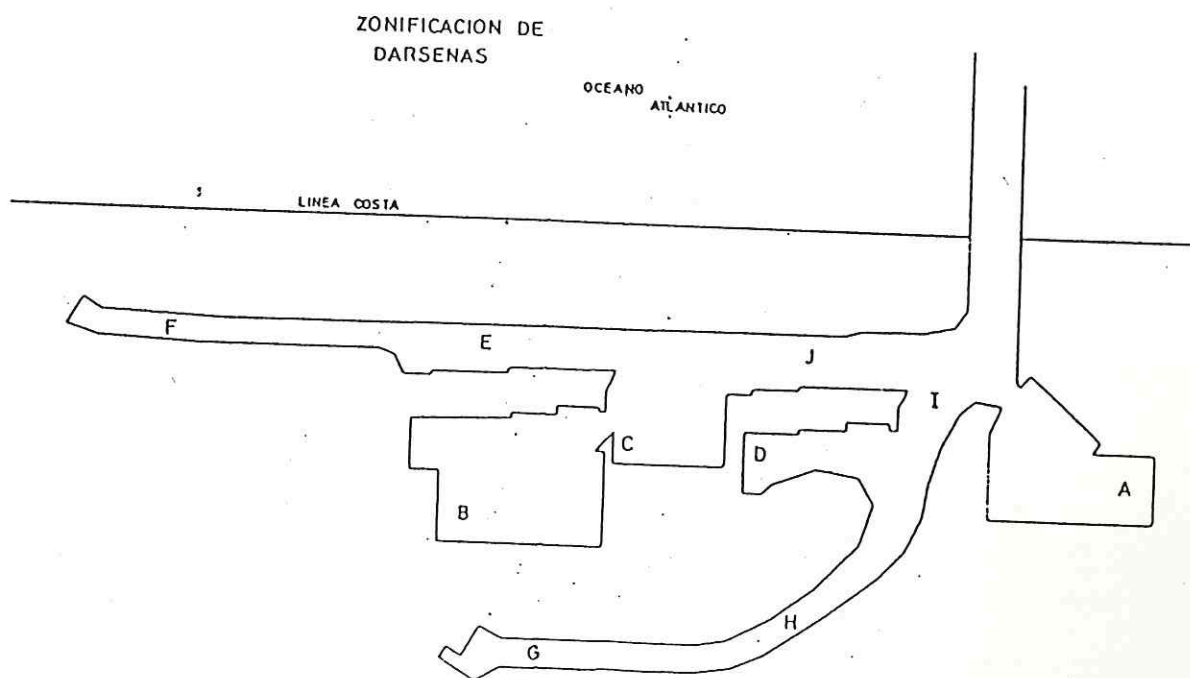
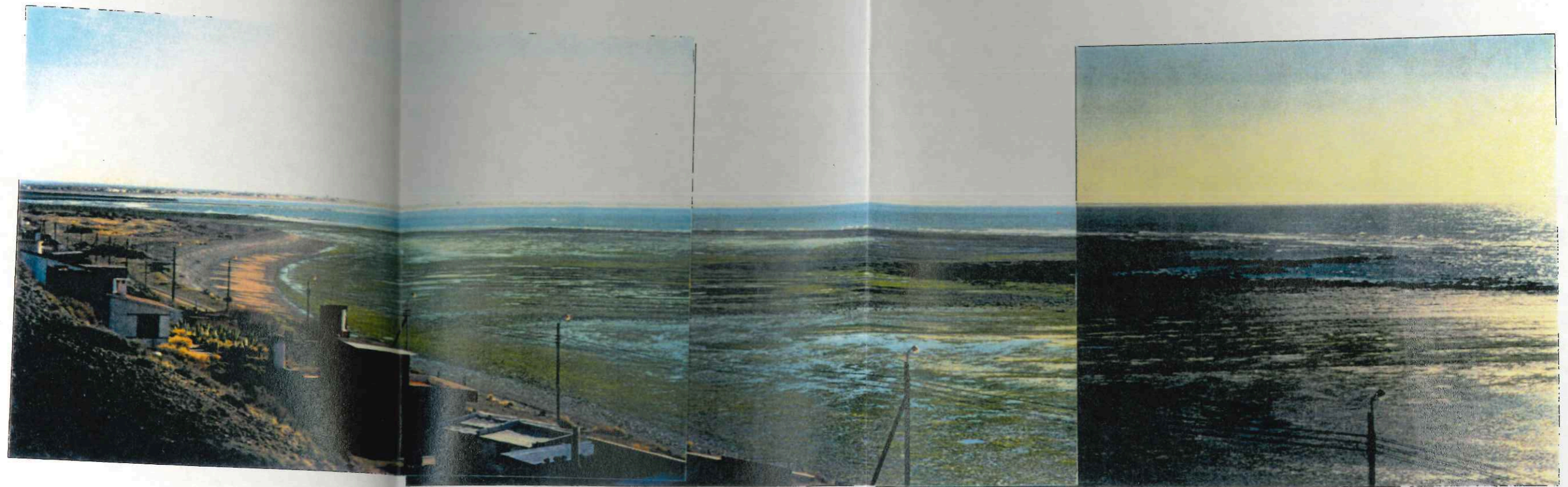


Figura 1. Esquema del puerto.

### IMPLEMENTACION DEL MODELO

La frontera de radiación, que separa las zonas interior y exterior, se ubicó en la boca del canal de acceso, uniendo a las dos escolleras. La mayor parte de las paredes internas de la marina están constituidas por un tablestacado vertical que, desde el punto de vista hidrodinámico, constituye un contorno impermeable sobre el cual el oleaje se refleja totalmente. El tratamiento de estos contornos resultó, entonces, trivial dado que constituyen una condición de borde de tipo natural. Las escolleras y las zonas protegidas con taludes inclinados se trataron como contornos parcialmente absorbentes, con coeficientes de absorción determinados por el proyectista de la obra.

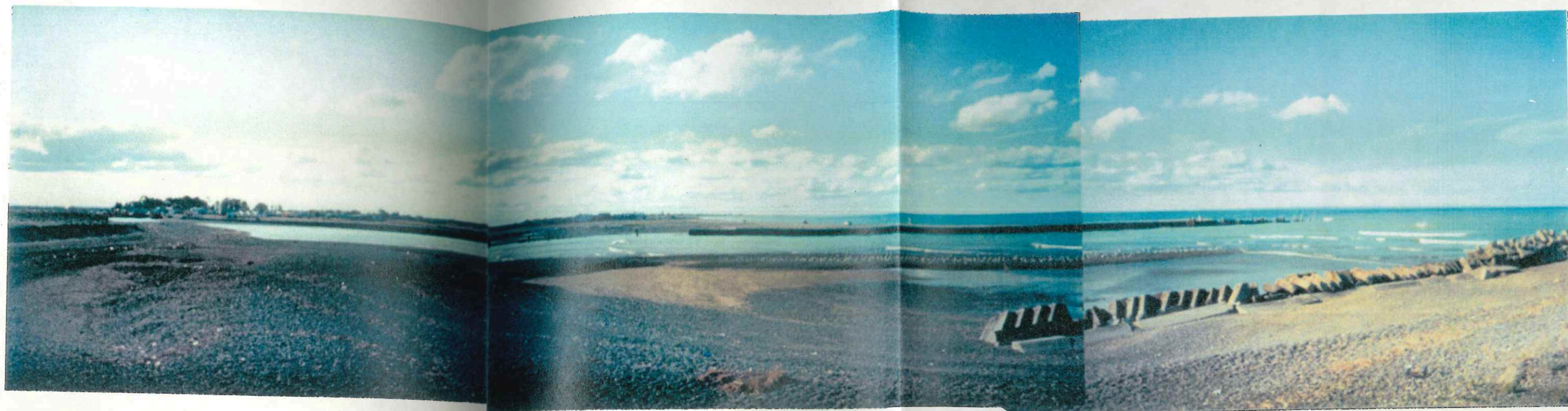
La malla de elementos finitos, mostrada en la Figura 2, fue generada en forma automática, a partir de la planimetría del contorno del puerto, utilizando el programa ENREDO, desarrollado por el grupo de Mecánica Computacional del Centro Atómico de Bariloche de la CNEA. Para lograr una adecuada representación numérica del problema, fue necesario trabajar con una malla de 13657 elementos y 7411 nodos, con lo cual las longitudes de onda más cortas estudiadas fueron representadas, al menos, con 5 elementos. Teniendo en cuenta que el potencial plano  $\Phi$  es complejo el número de incógnitas se duplica. Esto significó un requerimiento de 7 MBytes de memoria para el almacenamiento de los datos y tiempos de máquina en MicroVax del orden de los 80 minutos de CPU por ensayo.



Fotografia 1a



Fotografia 1b



Fotografia 3a



Fotografia 3b

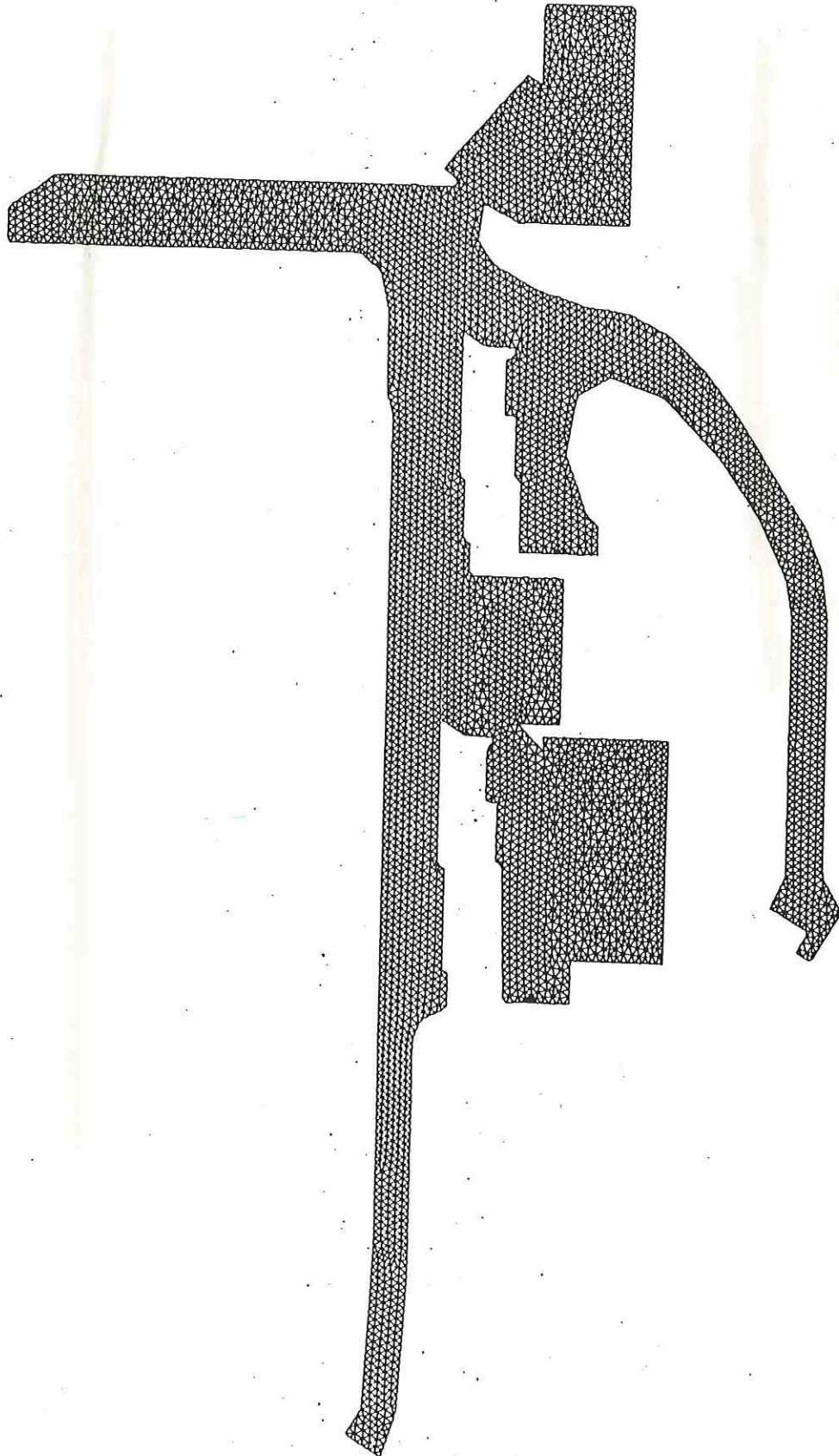


Figura 2. Malla de elementos finitos.

### RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Se efectuaron ensayos para diferentes condiciones del oleaje incidente, analizándose la efectividad de las estructuras de abrigo. En la Figura 3 se muestra una vista tridimensional de la superficie libre en la zona interior del puerto correspondiente a uno de los ensayos. Se observa que el nivel de agitación es marcadamente distinto en las diferentes dársenas.

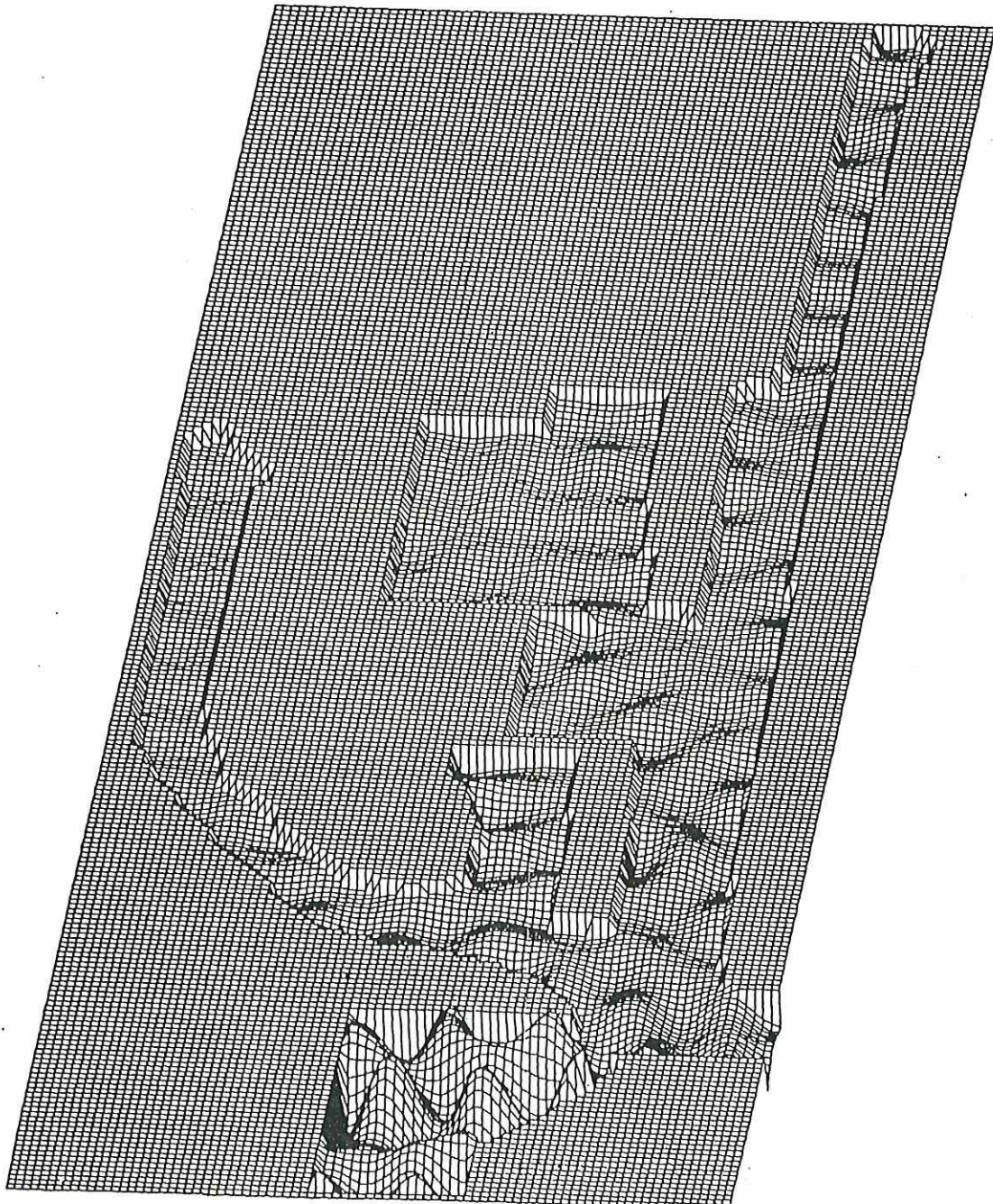


Figura 3. Vista tridimensional del interior del puerto.

En la Figura 4 se representa la amplitud del oleaje a lo largo del canal de acceso. Se observa que la atenuación es muy importante. Para olas con períodos comprendidos entre 5 y 7 segundos, que son las más frecuentes en esa región, la atenuación alcanza el 90 %, siendo algo más leve para períodos mayores. Se determinó que los taludes del canal de acceso juegan un rol muy importante en este proceso, dado que producen un efecto de refracción sobre las olas, orientándolas hacia las escolleras que protegen el canal, las cuales disipan gran parte de la energía de las olas incidentes.

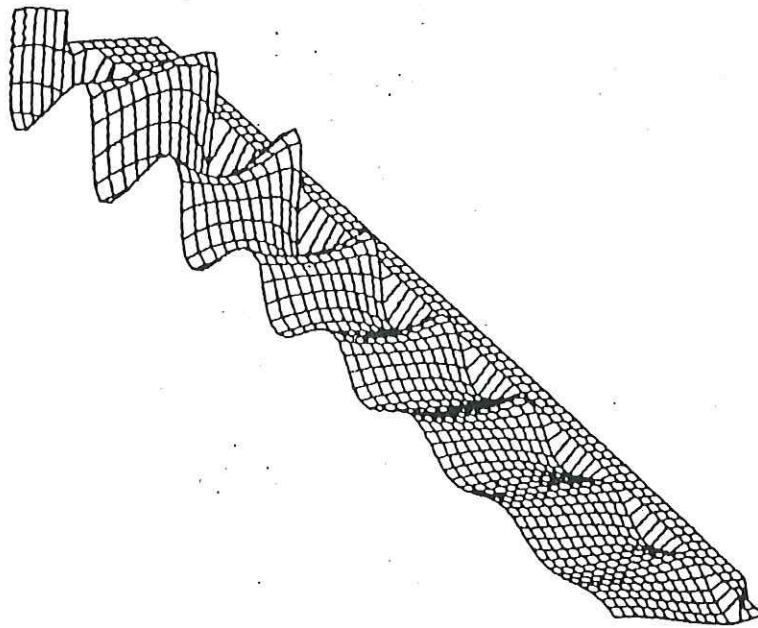


Figura 4. Atenuación del oleaje en el canal de acceso.

En la Figura 5 se presenta una vista tridimensional de detalle de la Dársena A, donde la agitación es mayor. La Figura 6 muestra las líneas de isoamplitud, relativa a la amplitud de la ola incidente, sobre todo el puerto. Dado que el modelo es de tipo lineal, estos resultados son independientes de la amplitud del oleaje incidente.

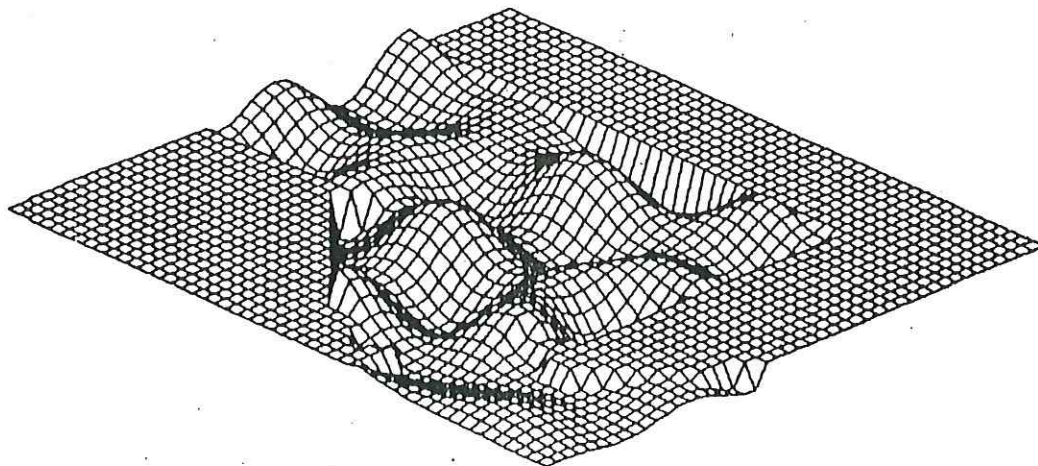


Figura 5. Vista tridimensional del oleaje en la Dársena A.

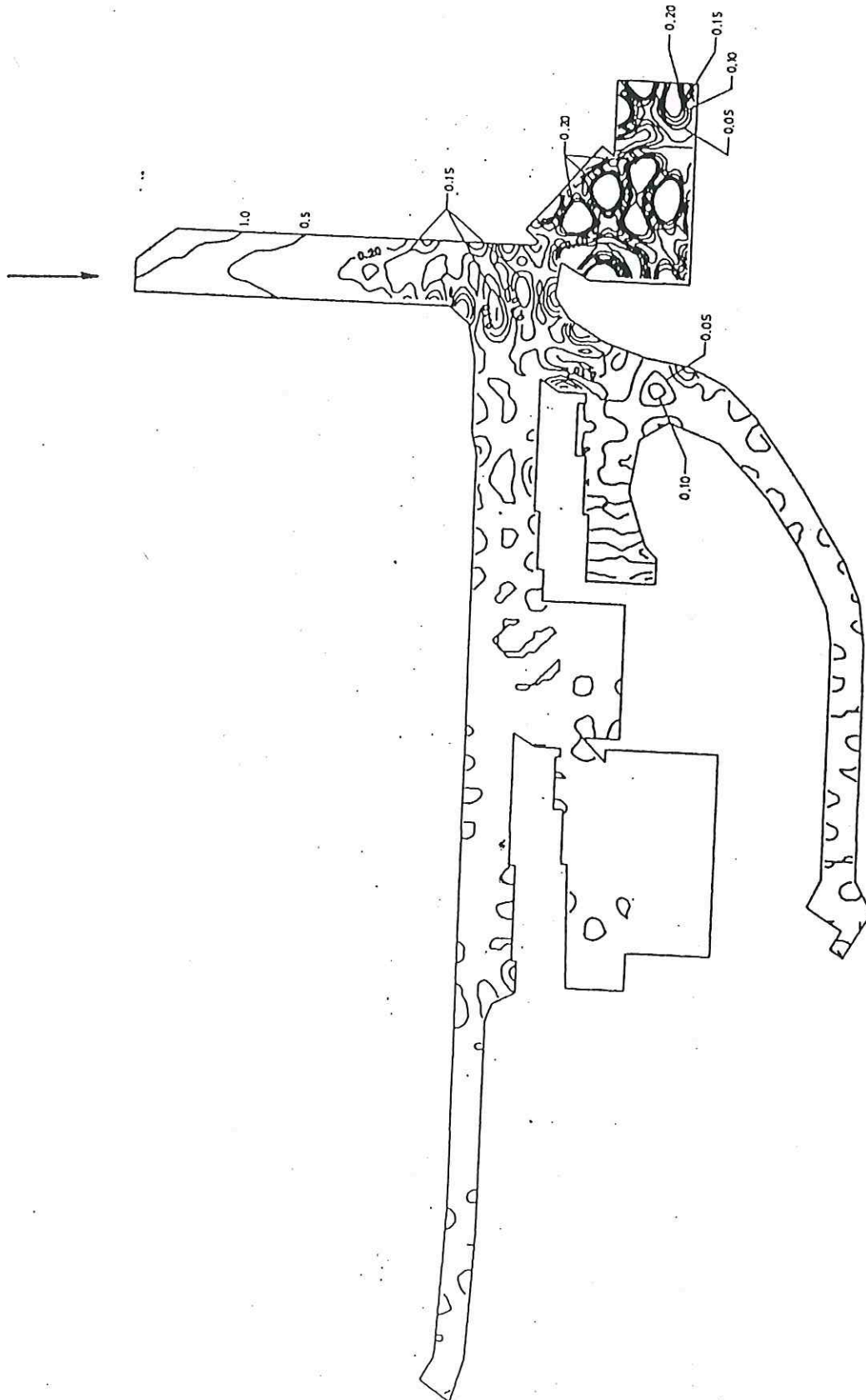


Figura 6. Líneas de isoamplitud.

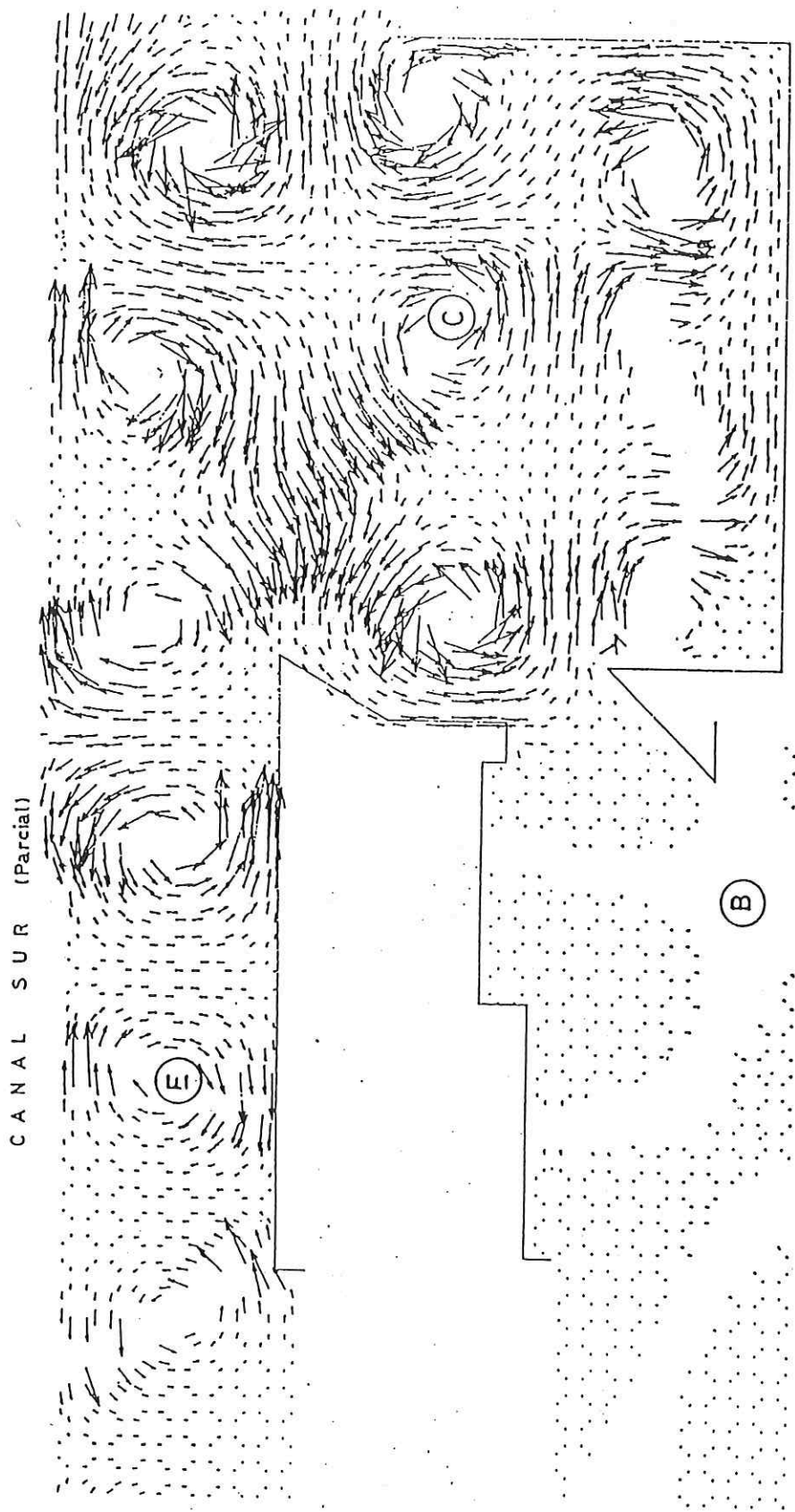


Figura 7. Campo de vectores número de onda.

La dirección de propagación del oleaje dentro de la marina es un parámetro importante de analizar desde el punto de vista práctico, ya que, según cómo estén orientadas las embarcaciones respecto de aquella, las alturas máximas de ola admisible son diferentes. En la Figura 7 la dirección de propagación del oleaje en un sector de la marina se representa mediante el campo de vectores número de onda.

Este fue graficado sólo donde la amplitud relativa supera el 5%. El módulo de los vectores está escalado respecto del correspondiente a una onda progresiva del mismo período. En la zona B se observa que los vectores número de onda son muy pequeños, lo cual corresponde a un sistema de ondas estacionarias. En las zonas C y E se distingue la presencia de puntos anfifrómicos, alrededor de los cuales giran los frentes de onda (normales al vector número de onda local).

Como todo sistema físico sometido a oscilaciones forzadas, los puertos pueden estar sujetos a fenómenos de resonancia<sup>7</sup>. Por ello, es importante analizar la agitación para todo el rango de períodos de olas factibles de existir. Se efectuaron una larga serie de ensayos para períodos comprendidos entre 9 y 60 segundos, con incrementos de entre 1 y 2 segundos, determinándose, en cada ensayo, la máxima amplitud en cada zona del puerto. En la Figura 8 se muestra el comportamiento de las Dársenas A y D. Se observa que la dársena A presenta varios picos, dos de ellos de relativa importancia. En particular, se ve que para un período de 9 segundos hay un pico secundario que prácticamente duplica la amplitud respecto de otras dársenas. Esta es, precisamente, la condición que corresponde a la vista tridimensional presentada en la Figura 3.

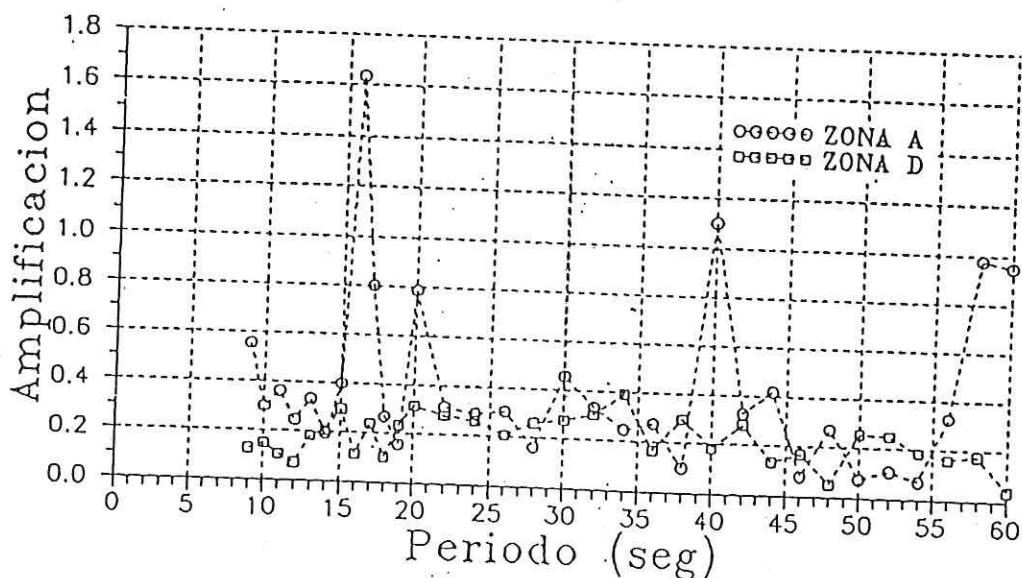


Figura 8. Curva de Resonancia.

## CONCLUSIONES

A través de la presentación de una aplicación, se ha ilustrado el alcance práctico de los resultados obtenidos con un modelo numérico de agitación por oleaje en el interior de un puerto desarrollado en el LHA. El estudio requirió de una estrecha colaboración entre los encargados del proyecto de la obra y los responsables del desarrollo y la operación del modelo, lo cual se tradujo en un pleno aprovechamiento de los resultados obtenidos.

## REFERENCIAS

1. C.A. Vionnet y A.N. Menéndez, "Difracción-Refracción combinadas de ondas de agua. Cálculo utilizando elementos finitos híbridos, incluyendo bordes absorbentes y disipación por fricción", *ENIEF'87*, San Carlos de Bariloche, (1987).
2. C.A. Vionnet, "Difracción-Refracción combinadas en ondas de agua", *Informe LHA-INCyTH 064-02-87*, (1987).
3. J.C.W. Berkhoff, "Computation of combined refraction-diffraction", *Proc. 13th. Conf. on Coastal Engineering*, Vancouver, (1972).
4. J.C.W. Berkhoff, N. Booij y A.C. Radder, "Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear waves", *Coastal Engineering 6*, Elsevier Publishers, pp. 255-279, Amsterdam, (1982).
5. N. Booij, "Gravity waves on water with non-uniform depth and current", *Report No. 81-1*, Delft University of Technology, (1982).
6. M.A. Cavaliere, R. Castellano y A.N. Menéndez, "Estudio de las condiciones de agitación en la marina de Punta del Este. Informe de avance No. 1", *Informe LHA-INCyTH 112-01-90*, (1990).
7. C.A. Vionnet, "Resonancia de puertos inducida por ondas gravitatorias", *Informe INCyTH 064-05-88*, (1988).