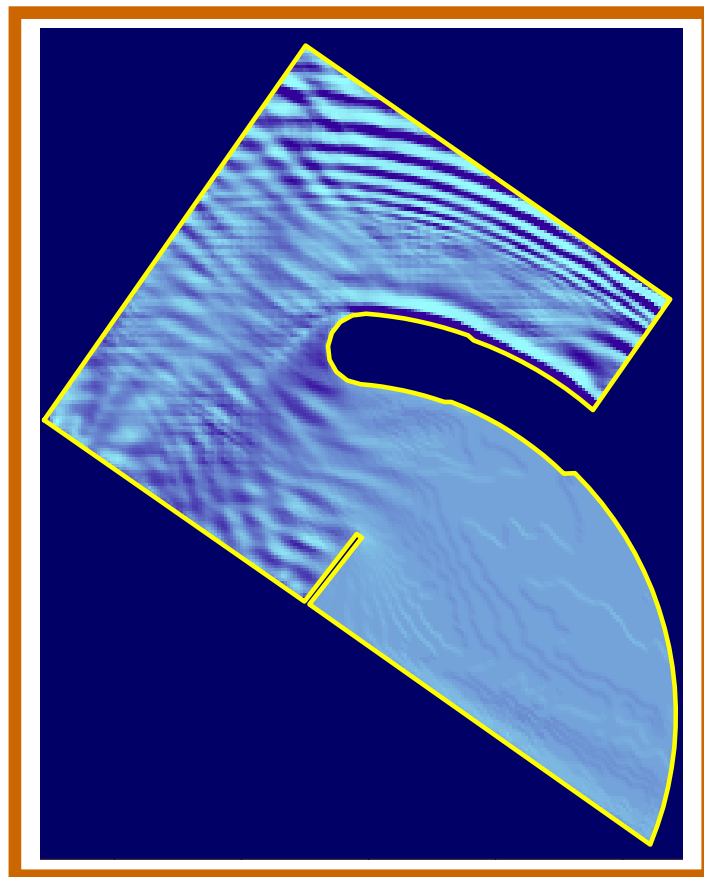


MARINA EL GOLFITO

**ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA
PARA LA OPTIMIZACION DEL PROYECTO**

INFORME FINAL



Agosto, 2005

Informe LHA-245-01-05

MARINA EL GOLFITO

**ESTUDIO MEDIANTE MODELACION MATEMATICA
PARA LA OPTIMIZACION DEL PROYECTO**

INFORME FINAL

RESUMEN

Se presentan los resultados de la aplicación del modelo matemático SWAN de generación de olas por viento en el Golfo Nuevo, y la estimación de la máxima altura de ola probable en las proximidades del acceso a la Marina El Golfito. Mediante la aplicación del sistema computacional DIFRAC se evaluó la altura de olas dentro de la dársena de amarre del puerto y se propusieron modificaciones al proyecto dirigidas al logro de las condiciones de calma requeridas.

PALABRAS CLAVE

Puertos – propagación de olas – agitación por oleaje - Golfo Nuevo – Puerto Madryn -



*Marina El Golfito
Estudio mediante modelación matemática
para la optimización del proyecto*

**INA
LABORATORIO DE HIDRAULICA**

DIRECTOR

Ing. J.C. De Lio

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

Ing. R. D. Castellano

Informe producido por

Ing. N. Tomazin

Equipo de trabajo

*Sr. C.A. Haspert
Sr. S.L. Peralta*

INDICE DE MATERIAS

1	INTRODUCCION _____	1
2	OBJETIVO _____	2
3	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO _____	2
4	DESCRIPCION DEL PROYECTO Y SU ZONA DE EMPLAZAMIENTO _____	3
	4.1 Información batimétrica _____	3
	4.1.1 Cartas Náuticas _____	3
	4.1.2 Relevamientos _____	3
	4.2 Planos de referencia _____	5
	4.3 Mareas _____	5
5	ANÁLISIS DE VIENTOS _____	6
	5.1 Condiciones medias del viento _____	6
	5.2 Análisis estadístico de valores extremos de vientos _____	8
	5.2.1 Metodología de ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidades _____	8
	5.2.2 Procedimiento del ajuste de datos _____	9
6	MODELO MATEMATICO DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE OLAS _____	13
	6.1 Características principales del modelo matemático _____	13
	6.2 Implementación del modelo _____	13
	6.2.1 Propagación de olas oceánicas _____	15
	6.2.2 Generación de olas por vientos locales _____	17
	Tabla 6.1. Resultado de las simulaciones con viento Norte _____	18
	6.2.3 Comparación entre olas oceánicas y olas generadas localmente _____	22
7	MODELO MATEMÁTICO DE AGITACION EN EL AREA PORTUARIA _____	24
	7.1 Metodología de cálculo _____	24
	7.2 Implementación del modelo _____	25
	7.2.1 Red de elementos finitos _____	25
	7.2.2 Representación del espectro de olas incidentes _____	26
	7.3 Escenarios de cálculo _____	26
	7.4 Resultados _____	27
	7.4.1 Configuración I _____	27
	7.4.2 Configuración Ib _____	30
	7.4.3 Configuración II _____	34
	7.4.4 Configuración III _____	37
8	CONCLUSIONES _____	41
9	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS _____	43

ANEXO I. Generación y propagación de olas. Figuras

ANEXO II. Configuraciones portuarias estudiadas

ANEXO III. Difracción de olas. Figuras.

ANEXO IV. El modelo DIFRAC.

ANEXO V. Comparación con otras modelaciones

MARINA EL GOLFITO ESTUDIO MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROYECTO

1 INTRODUCCION

A requerimiento de la **SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA, PLANEAMIENTO Y SERVICIOS PUBLICOS (SIPySP)** de la **DIRECCIÓN GENERAL DE INFRAESTRUCTURA PORTUARIA** de la **PROVINCIA de CHUBUT**, el **LABORATORIO DE HIDRAULICA (LHA)**, dependiente del **INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA (INA)**, ha realizado los estudios mediante modelación matemática de la propagación de olas y agitación por oleaje, a los efectos de evaluar la capacidad de protección que las obras proveen al acceso e interior del puerto en el desarrollo del proyecto para la construcción de la **Marina El Golfito**.

Los estudios se realizaron mediante la suscripción del Acta Complementaria N°3 del Convenio Marco de Cooperación e Investigación suscripto en Agosto de 2002.

2 OBJETIVO

El presente estudio fue desarrollado con el objetivo de determinar las características del clima de olas en la región de emplazamiento de la marina El Golfito y de analizar las condiciones de agitación producidas por el oleaje dentro del recinto portuario definido en el proyecto. Con este análisis se busca la determinación de valores de alturas y períodos de olas incidentes sobre las estructuras que conforman las obras de abrigo de la planta portuaria y la verificación de condiciones de seguridad para las embarcaciones amarradas en el interior del puerto.

3 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

El estudio se inició con el desarrollo de un análisis estadístico de los vientos registrados sobre el Golfo Nuevo destinado a la definición de escenarios climatológicos para el estudio de generación de olas y su propagación hacia la costa en la zona de emplazamiento del proyecto de la marina El Golfito.

La fuente de información utilizada para dicha tarea consistió en registros de vientos obtenidos por el Centro Nacional Patagónico (CENPAT) en la Estación Meteorológica Puerto Madryn . Las condiciones más frecuentes (valores medios) para la dirección e intensidad de los vientos fueron provistas directamente por el CENPAT. Para la definición de valores de intensidad asociados a distintos períodos de retorno (valores extremos) se realizó el ajuste de series de máximos anuales utilizando las funciones de Gumbel y Weibull, para cada una de las direcciones de interés.

Los escenarios de viento seleccionados a partir del resultado del análisis estadístico se utilizaron como dato de ingreso para el modelo **SWAN** (Simulating Waves Nearshore), aplicado para el estudio de generación de olas por acción del viento y su propagación hacia la zona de costa. Combinando distintas condiciones de viento (intensidad y dirección) con distintos niveles de marea, se obtuvo un conjunto de valores de altura y período de olas que describen las condiciones más frecuentes y las condiciones notables del oleaje en la zona de emplazamiento de la dársena. La aplicación de **SWAN** permitió además estudiar el ingreso de olas oceánicas al Golfo Nuevo y su propagación hacia la zona costera donde se prevé la construcción de la Marina El Golfito, evaluando su incidencia en el clima de olas local.

Para estudiar las condiciones de agitación producidas por el oleaje dentro del recinto portuario se aplicó el modelo numérico **DIFRAC**, el cual utiliza el método de los elementos finitos para la resolución de problemas diferenciales elípticos.

Trabajando sobre una malla de cálculo constituida por un número cercano a los 100.000 elementos triangulares, el modelo toma como datos de entrada los valores de altura y período de olas en un contorno próximo a la boca de acceso al puerto, obtenidos como resultado de la aplicación de **SWAN**, y calcula el campo de olas resultante para la región modelada teniendo en cuenta los procesos físicos principales para la transformación de las olas en esa región: difracción, refracción, y reflexión.

4 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y SU ZONA DE EMPLAZAMIENTO

El proyecto desarrollado por la Provincia de Chubut prevé la construcción de la Marina El Golfito en las proximidades de la ciudad de Puerto Madryn, situada sobre la costa sur del Golfo Nuevo (**Figura 4.1**).

El lugar elegido para el emplazamiento de la obra es la zona denominada como Playa Kaiser, ubicada al sur de la ciudad de Puerto Madryn, a unos 5 km del centro de la misma. Playa Kaiser posee aproximadamente 2.8 km de extensión y se encuentra emplazada entre dos puntas de material consolidado: Punta Este y Punta Cuevas, las cuales brindan un cierto grado natural contra la acción del oleaje incidente en esta zona de la costa.

La playa tiene una orientación general NO-SE y está conformada por cantos rodados y arenas mezclados con conchillas y materiales orgánicos. Presenta una cara de fuerte pendiente y una berma de pendiente más suave. La parte posterior de la playa está limitada por formaciones de arcilla consolidada y arena.

La construcción de la Marina se encuentra destinada fundamentalmente al desarrollo de actividades náuticas con fines deportivos y recreativos, contemplando en sus instalaciones el amarre de un número cercano a las 250 embarcaciones.

Las obras de protección contra la acción del oleaje se encuentran constituidas por una escollera principal de enrocado, con una extensión aproximada de 550 m, y un muro vertical de cajones premoldeados de aproximadamente 160 m que contribuye al cierre lateral del recinto portuario.

El proyecto prevé un área de relleno de 5.3 Has. que ingresa en el mar unos 160 m desde la línea de costa, limitado por un muro frontal de tablestacas desde el cual se extienden cinco muelles flotantes destinados al amarre de embarcaciones.

4.1 Información batimétrica

4.1.1 *Cartas Náuticas*

Como información de base para cubrir el área a modelar se utilizaron las siguientes Cartas Náuticas publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (SHN), las que fueron parcialmente digitalizadas:

- Carta H-218 Golfo Nuevo. Escala 1:110.000
- Carta 92 Golfo Nuevo-Puerto Madryn. Escala 1:40.000

4.1.2 *Relevamientos*

La información batimétrica de detalle fue suministrada por el Lic. Néstor Guardamagna, corresponde a relevamientos realizados en la zona de estudio durante los meses de Febrero y Marzo de 2005 y estuvo contenida en los siguientes archivos:

- 000000TH.R02

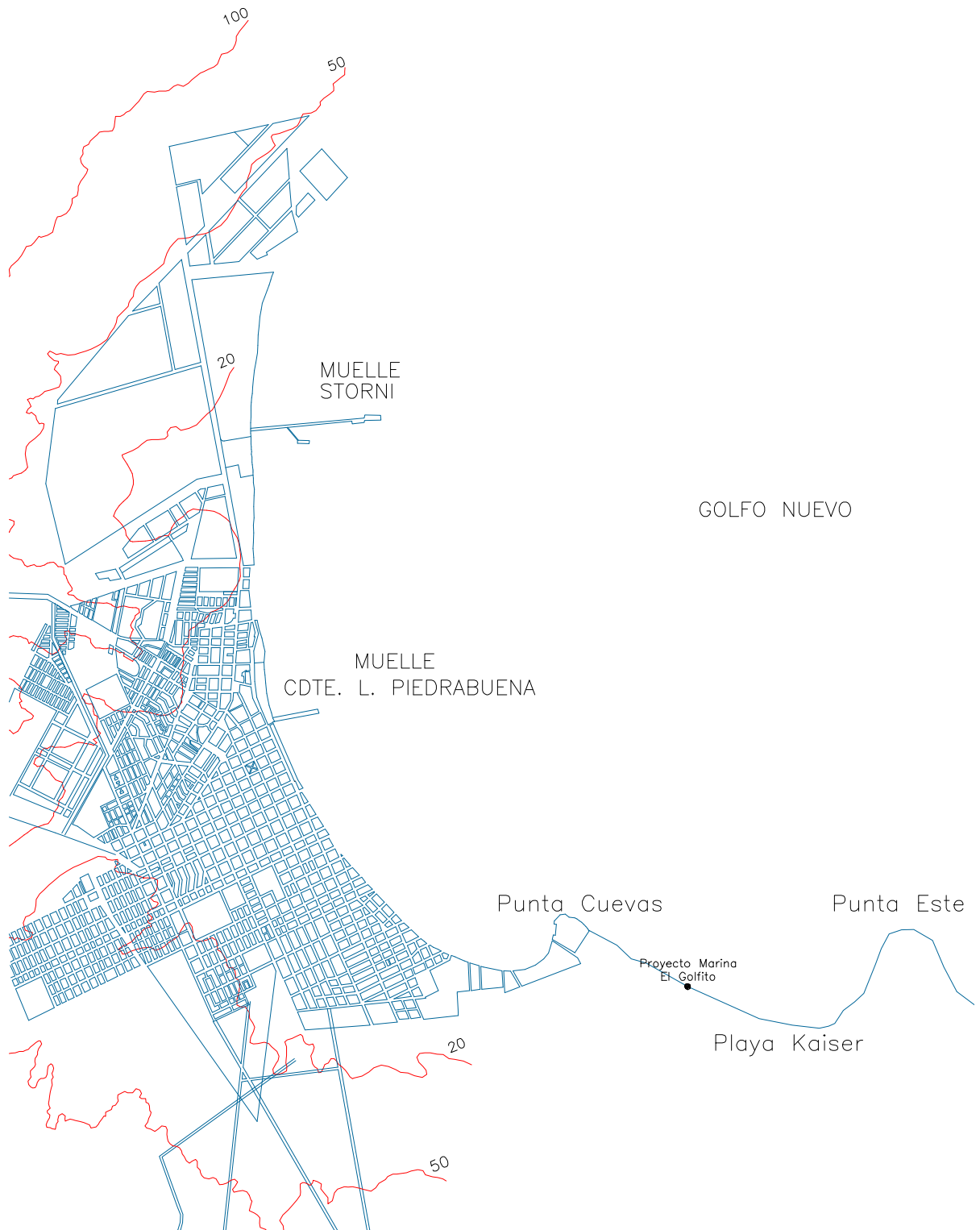


Figura 4.1. Ubicación de la zona de emplazamiento del proyecto

- 000050CL.R02
- 000100CL.R02
- 000150CL.R02
- 000200CL.R02
- 000400CL.R02
- 000500CL.R02
- 000550CL.R02
- 000650CL.R02
- 000750CL.R02
- 000850CL.R02
- 000950TH.R02
- 001000CL.R02
- 001100CL.R02
- 001300CL.R02
- 001400CL.R02
- 001450CL.R02
- 000700CL.R03
- 000800CL.R03
- 001500TH.R03

Estos archivos contienen valores de coordenadas X,Y,Z de relevamientos realizados en un área aproximada de 340 Ha, abarcando la zona de emplazamiento de las obras y sus adyacencias. Las coordenadas X,Y están expresadas en m, en sistema Gauss-Kruger. La coordenada Z representa la profundidad local, se expresa en m y está referida al plano de reducción del SHN.

4.2 Planos de referencia

La información mareológica y batimétrica utilizada en este informe se encuentra referida al plano de referencia del Servicio de Hidrografía Naval (SHN), ubicado a 2.99 m debajo del nivel medio ó 0,58 m sobre el cero del mareógrafo.

4.3 Mareas

Según la tabla de predicción de la marea astronómica para el año 2005, confeccionada por el Servicio de Hidrografía Naval, los valores correspondientes a Puerto Madryn son los siguientes:

Pleamar		Bajamar		Amplitud	
Máxima	Media	Más Baja	Media	Máxima	Media
5.74	4.86	-0.13	1.02	5.55	3.84

Considerando el efecto de la elevación del nivel del mar por acción del viento (marea meteorológica), el proyecto de diseño de las obras de abrigo contempló un nivel máximo de la marea de 6.52 m. Este valor, definido en el proyecto de la obra, fue adoptado posteriormente en la modelación del oleaje para la condición de pleamar.

5 ANÁLISIS DE VIENTOS

En esta sección se presenta un análisis estadístico de la variable meteorológica viento, utilizando como fuente de información las observaciones horarias efectuadas en la estación Puerto Madryn del CENPAT (Latitud: 42° 46'; Longitud: 65° 02').

Las mediciones de la velocidad y dirección del viento se realizan a una altura sobre el nivel del suelo de 10 m, de acuerdo a las normas que establece la Organización Meteorológica Mundial. El instrumento sensor es un anemómetro a copelas para la velocidad y una veleta para la dirección del viento. Un equipo de adquisición de datos automático toma muestras de cada variable cada diez segundos, durante un período de una hora (360 muestras) con las cuales se obtiene el valor medio de la hora, base de las presentes estadísticas.

La distribución por direcciones se efectúa sobre una rosa de los vientos equi-espaciada 45° (centrada en 0°) es decir se consideraron los siguientes sectores: Norte, Noreste, Este, Sudeste, Sur, Sudoeste, Oeste y Noroeste. Debe entenderse que las direcciones del viento se refieren al sector de procedencia del mismo.

La información disponible fue procesada de manera tal de poder describir las características medias del viento, identificando las situaciones más frecuentes en cuanto a dirección e intensidad, y de analizar valores extremos, estimando para las direcciones de interés las intensidades máximas asociadas a distintos períodos de retorno.

5.1 Condiciones medias del viento

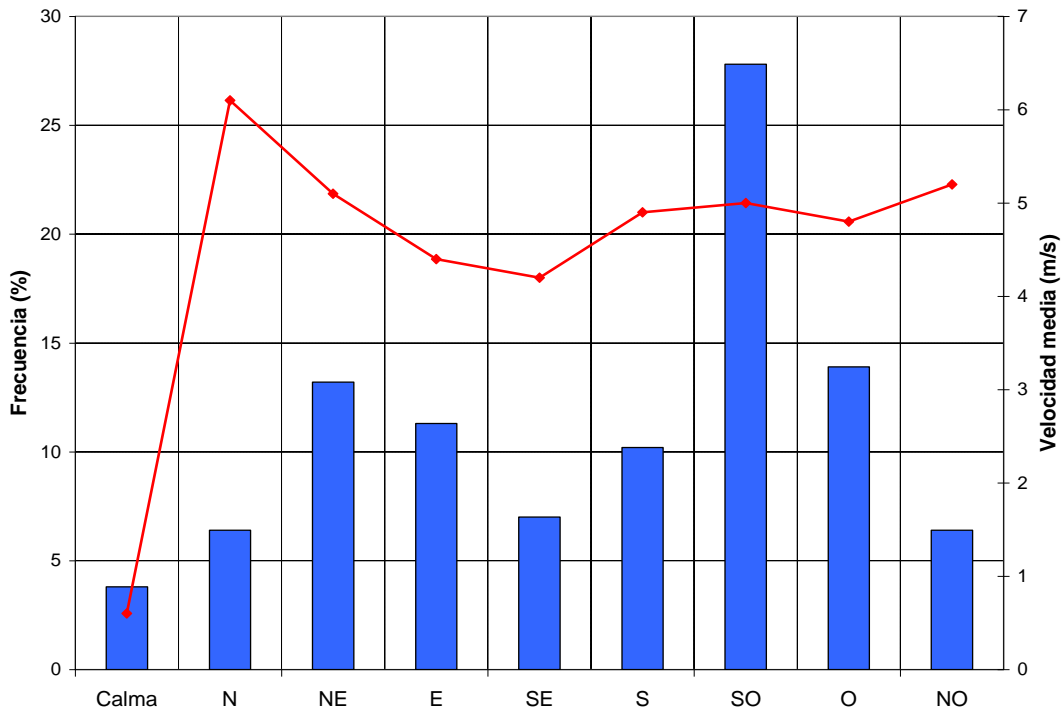
La descripción de las características medias del viento en la región resulta de particular interés para el estudio de generación de olas y el pronóstico de las condiciones más frecuentes del oleaje.

Sobre la base de un registro de diez años de información (período 1989-1998) se analizaron la distribución de las frecuencias para la dirección del viento y las velocidades medias anuales para cada dirección.

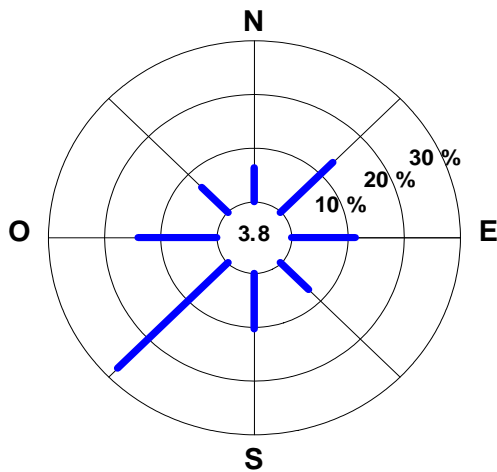
La presentación de los resultados se efectúa por medio de tablas simplificadas (**Tabla 5.1**), histogramas (**Figura 5.1a**) y gráficos circulares (rosa de los vientos, **Figura 5.1b**). En estos últimos, se indican en los círculos concéntricos los valores del porcentaje de frecuencia (10 al 30 %) y porcentaje de calmas en el centro, y de la velocidad media anual del viento para valores mayores a 3 m/s.

Tabla 5.1. Condiciones medias anuales del viento

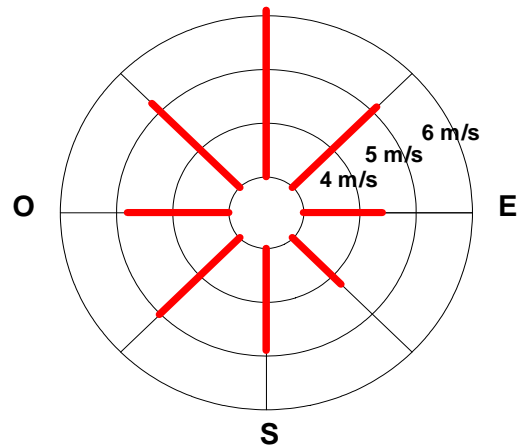
Período (1989-1998)	Calma	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Frecuencia (%)	3.8	6.4	13.2	11.3	7.0	10.2	27.8	13.9	6.4
Velocidad media (m/s)	0.6	6.1	5.1	4.4	4.2	4.9	5.0	4.8	5.2



Distribución de Frecuencia



Distribución de Velocidades



Figuras 5.1.a) y b). Distribución de Frecuencias y Velocidades medias anuales del viento

Los valores presentados en la **Tabla 5.1** y en las **Figuras 5.1a) y b)** muestran el predominio de la dirección SO (27.8%) en la distribución anual de la frecuencia del viento, siguiéndole en importancia las direcciones O (13.9%) y NE (13.2%). Con respecto a los valores de intensidad media anual, se destaca claramente la dirección N (6.1m/s), siguiendo luego las direcciones NO (5.2m/s) y NE (5.1m/s).

5.2 Análisis estadístico de valores extremos de vientos

El propósito de este análisis es la determinación de valores de intensidad máxima de vientos asociados a distintos períodos de recurrencia. Dichos valores fueron utilizados posteriormente para estudiar la generación de olas por acción del viento dentro del Golfo Nuevo y su propagación hacia la zona de emplazamiento del proyecto, pudiéndose determinar, a partir de ello, distintos escenarios de análisis para los estudios de estabilidad de las obras de abrigo y de agitación en el interior del recinto portuario.

Los datos utilizados para este análisis corresponden a valores máximos anuales de intensidad media horaria del viento registrados por el CENPAT en la Estación Meteorológica Puerto Madryn durante el período 1989-2004.

5.2.1 Metodología de ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidades

La serie de datos obtenida de los registros es considerada como una muestra acotada de una población donde la probabilidad de ocurrencia de un evento (en este caso que la intensidad del viento alcance un cierto valor x) se describe por medio de una función de distribución de probabilidades $F(x)$ determinada.

De las distintas $F(x)$ existentes, utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos de viento, se seleccionaron para este estudio las siguientes:

Gumbel $F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x-u)))$

Weibull $F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)^c\right)$

Para el ajuste de los datos a una $F(x)$ determinada se realiza la estimación de los parámetros de la función utilizando distintos algoritmos numéricos basados en el método de los momentos y el método de máxima verosimilitud. Una vez obtenida la función de ajuste, es posible estimar el valor de la variable x que se encuentra asociado a distintos períodos de recurrencia TR.

La bondad del ajuste es evaluada con la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Esta prueba se basa en la comparación entre la función teórica de ajuste $F(x)$ y la función de probabilidades acumuladas $S(x)$ construida con los datos de la muestra. El estadístico de la prueba es:

$$D = \max |S(x) - F(x)|$$

Si el valor de D (divergencia) supera un cierto el valor de la tabla del test, correspondiente a un nivel de significación α , escogido previamente, entonces la hipótesis del ajuste debe ser rechazada, es decir, la función $F(x)$ seleccionada no representa adecuadamente la distribución de la población de datos a la cual pertenece la muestra.

5.2.2 Procedimiento del ajuste de datos

Teniendo en cuenta el lugar de emplazamiento del proyecto y analizando, consecuentemente, las posibles direcciones de incidencia del oleaje, fueron seleccionadas para el análisis tres series de datos, correspondientes a las direcciones de viento Norte, Este y Noreste. Cada una de las series está constituida por valores máximos anuales de intensidades medias horarias registradas por el CENPAT para el período de tiempo comprendido entre 1989 y 2004. Las series de datos mencionadas son presentadas en la **Tabla 5.2**.

Tabla 5.2. Valores máximos anuales de intensidad media horaria (m/s)

Año	Norte	Este	Noreste
1989	14.6	11.1	11.9
1990	16.3	12.4	12.6
1991	14.9	15.7	14.2
1992	13.5	9.7	12.7
1993	16.7	13.4	13.4
1994	14.9	13.5	13.0
1995	15.6	10.5	12.9
1996	13.1	9.7	11.6
1997	13.4	12.2	12.3
1998	15.6	12.9	11.6
1999	13.9	11.8	11.1
2000	13.6	10.1	10.7
2001	18.3	11.5	13.1
2002	13.8	10.2	10.0
2003	12.7	10.0	10.8
2004	12.1	8.1	10.4

La **Tabla 5.2** muestra que para las tres direcciones analizadas los vientos más intensos son los provenientes del Norte, habiéndose registrado un valor máximo de 18.3 m/s en el año 2001. Para las direcciones Este y Noreste las intensidades máximas anuales suelen ser menores, habiéndose registrado valores de 15.7 m/s y 14.2 m/s, respectivamente, en el año 1991.

Con el fin de estimar los parámetros de ajuste de las funciones de Gumbel y de Weibull para las series de datos presentados en la **Tabla 5.2**, se aplicaron algoritmos numéricos basados en el método de máxima verosimilitud. En las **Tablas 5.3 a 5.5** se presentan los resultados de dicho procedimiento, mostrando para cada una de las series analizadas, el valor estimado para los parámetros de ambas funciones y el resultado del test de Kolmogorov-Smirnov utilizado para evaluar la bondad del ajuste.

Tabla 5.3. Resultados del ajuste para la serie de valores de la dirección Norte

Datos CENPAT 1989-2004	Gumbel	Weibull
Parámetros estimados	$\alpha=0.785$ $u=13.827$	$c=1.744$ $\alpha=3.038$ $\xi=11.850$
Estadístico D_{max}	0.0823	<u>0.0786</u>
Resultado del test $\alpha=0.05$	No se rechaza H_0	No se rechaza H_0

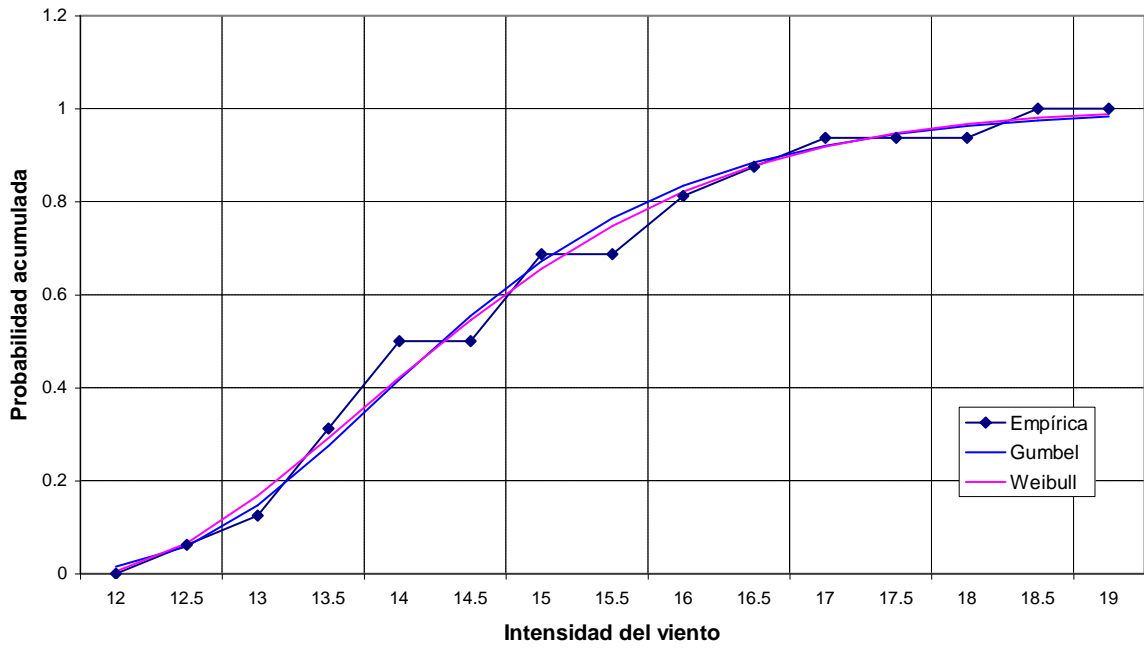
Tabla 5.4. Resultados del ajuste para la serie de valores de la dirección Noreste

Datos CENPAT 1989-2004	Gumbel	Weibull
Parámetros estimados	$\alpha=1.069$ $u=11.479$	$c=2.563$ $\alpha=4.019$ $\xi=9.300$
Estadístico D_{max}	0.1523	<u>0.1097</u>
Resultado del test $\alpha=0.05$	No se rechaza H_0	No se rechaza H_0

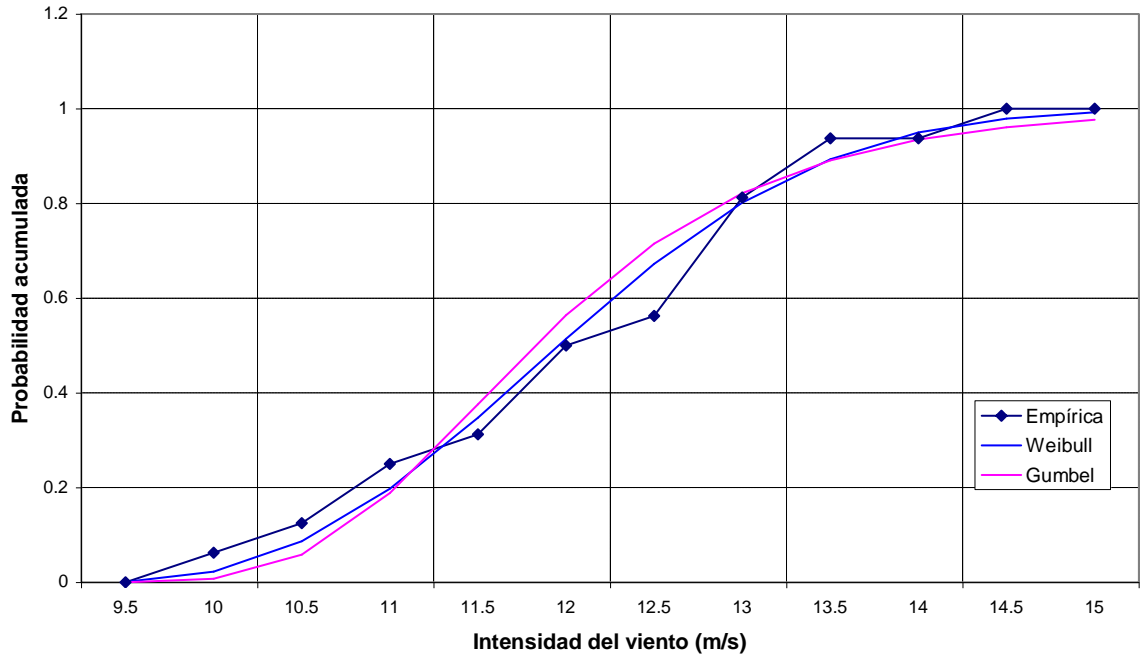
Tabla 5.5. Resultados del ajuste para la serie de valores de la dirección Este

Datos CENPAT 1989-2004	Gumbel	Weibull
Parámetros estimados	$\alpha=0.678$ $u=10.574$	$c=2.470$ $\alpha=4.676$ $\xi=7.200$
Estadístico D_{max}	<u>0.0880</u>	0.1058
Resultado del test $\alpha=0.05$	No se rechaza H_0	No se rechaza H_0

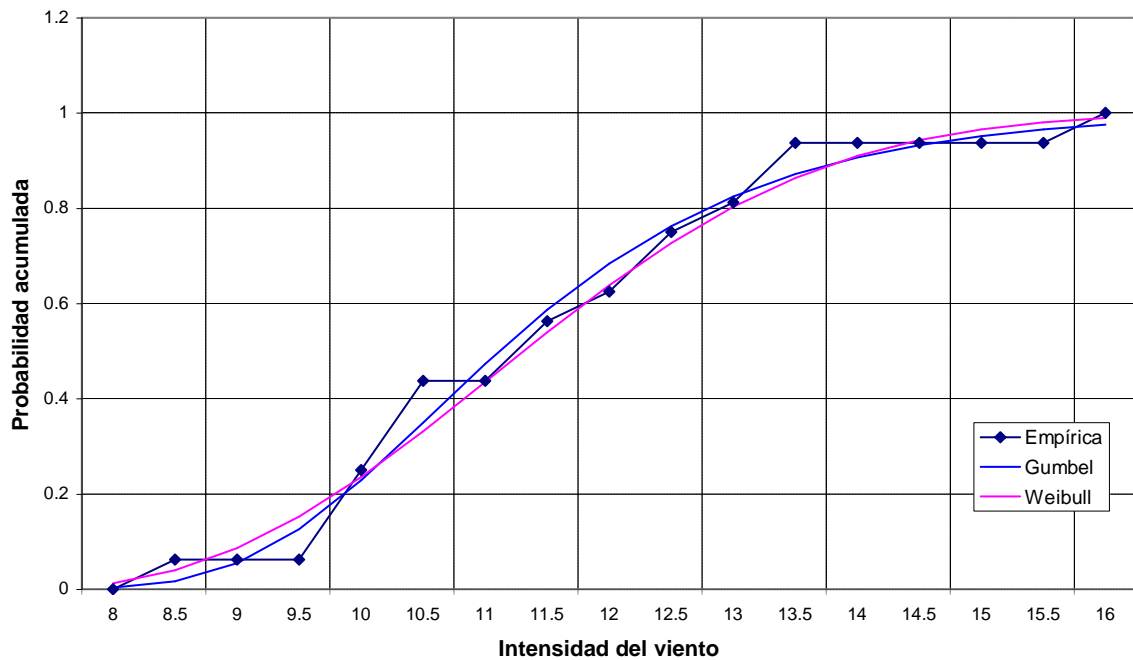
Los resultados señalan que las dos funciones propuestas pueden ajustarse a las series datos observados para las tres direcciones analizadas, dado que en ninguno de los casos es posible rechazar la hipótesis del ajuste H_0 para un nivel de significación de $\alpha=0.05$. Las **Figuras 5.2 a 5.4** permiten apreciar el nivel de ajuste, mostrando el grado de aproximación entre la función empírica $S(x)$ y las tres funciones de distribución utilizadas: Gumbel y Weibull.



Figuras 5.2. Funciones de distribución de probabilidades para la dirección Norte



Figuras 5.3. Funciones de distribución de probabilidades para la dirección Noreste



Figuras 5.4. Funciones de distribución de probabilidades para la dirección Este

Aunque ambas funciones pueden de ajustarse adecuadamente a las series de datos, para las direcciones Norte y Noreste la distribución de Weibull mostró valores de divergencia máxima (Dmax) menores que los del Gumbel, y en el caso del Este los valores Dmax resultaron muy cercanos. Por tal motivo, para estimar los valores de intensidades máximas del viento asociados a distintos períodos de retorno se eligió a la función de Weibull para las tres direcciones. Dichos valores son presentados en la **Tabla 5.6**.

Tabla 5.6. Intensidades máximas del viento (m/s) para distintos períodos de retorno

Período de retorno TR (años)	Norte	Este	Noreste
2	14.6	11.3	12.8
5	15.8	13.0	14.1
10	16.8	13.9	14.9
20	17.5	14.6	15.5
50	18.5	15.5	16.1
100	19.1	16.0	16.6

Dado que este análisis fue realizado con series de datos constituidas por dieciséis valores (máximos anuales del período 1989-2004) es preciso señalar que los valores estimados para períodos de retorno de 100 años se encuentran asociados a una incertidumbre natural manifestada por la escasa longitud de la serie. A pesar de ello, estos valores resultan de gran interés práctico y fueron utilizados como datos de entrada para la simulación de las condiciones extremas del oleaje.

6 MODELO MATEMATICO DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE OLAS

El estudio de las características del oleaje imperante en la zona del proyecto tiene como objetivo proveer datos de altura, período y dirección de olas necesarios para la verificación de la estabilidad de las estructuras de abrigo y para el análisis de la agitación dentro del recinto portuario.

Dadas las características geográficas de la región, resultó necesario analizar la propagación de olas oceánicas ingresantes al Golfo Nuevo y la generación de olas producida por la acción de vientos locales. Para la ejecución de ambas tareas se aplicó el modelo **SWAN** (Simulating WAVes Nearshore, L.H. Holthuijsen, N. Booij y otros) desarrollado en Delft University of Technology.

6.1 Características principales del modelo matemático

El modelo SWAN es una herramienta utilizada ampliamente en la actualidad dentro del campo de la ingeniería de costas. En la bibliografía internacional se presentan numerosas aplicaciones de SWAN para la modelación del oleaje en zonas de costa marítima, lagos y estuarios.

Este modelo se basa en una representación espectral de la ecuación de balance de acción de olas (o balance de energía en ausencia de corrientes) con todos los procesos físicos modelados explícitamente.

El modelo permite la simulación de los siguientes procesos:

- Propagación rectilínea a través del espacio físico.
- Refracción debida a la variación de la profundidad y corriente.
- Bajío debido a la variación de la profundidad y la corriente.
- Propagación de ola con corrientes opuestas.

Los siguientes procesos de generación y disipación de olas son representados por SWAN:

- Generación de olas por viento
- Disipación por descrestamiento (whitecapping)
- Disipación por rotura de ola inducida por la profundidad
- Disipación inducida por la fricción del fondo
- Interacción no lineal entre frecuencias del espectro en aguas profundas y someras.

Los resultados de cada aplicación se expresan sobre una malla de cálculo, permitiendo de esta manera conocer un campo de olas distribuido en forma espacial dentro de un área de interés determinada.

6.2 Implementación del modelo

La implementación del modelo requirió la construcción de tres grillas de cálculo de diferentes dimensiones, las cuales, acopladas convenientemente, permitieron propagar olas oceánicas desde el exterior del Golfo Nuevo y olas generadas por vientos locales hasta la zona de emplazamiento del proyecto, obteniendo los resultados de la modelación sobre una región de cálculo con una descripción batimétrica detallada.

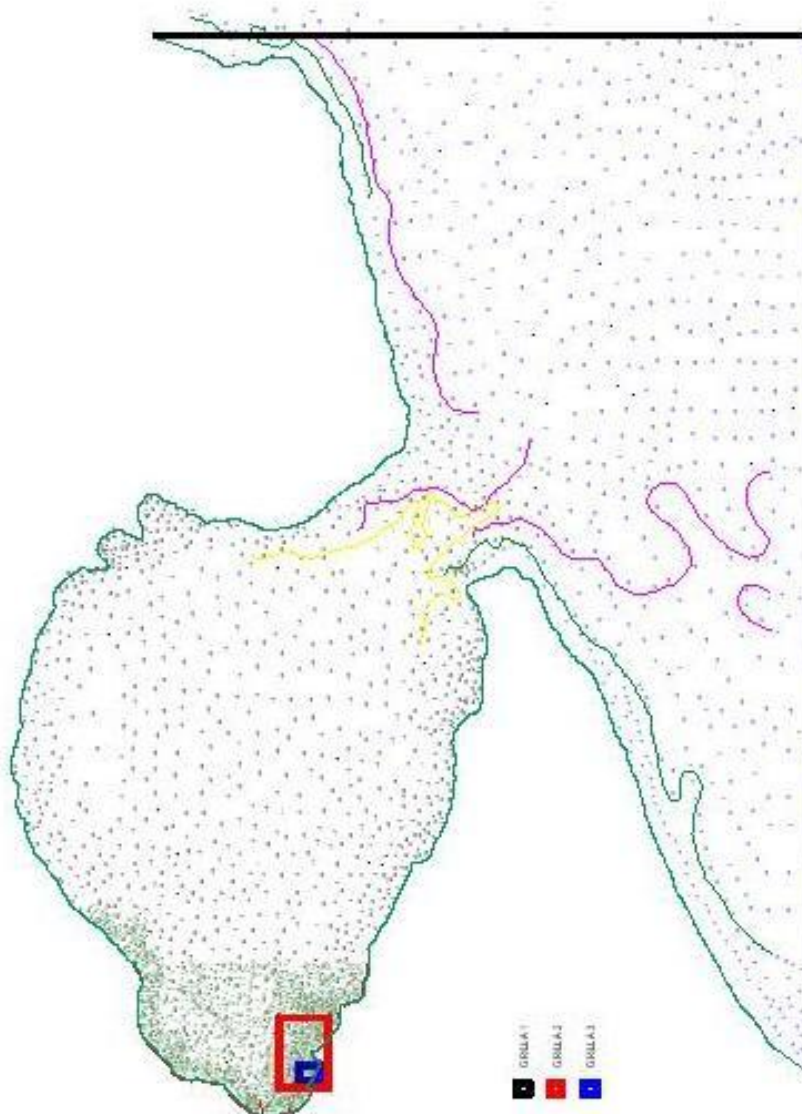


Figura 6.1. Grillas de cálculo para la modelación del oleaje

La **Figura 6.1** muestra la ubicación y el tamaño de las tres grillas utilizadas para la implementación del modelo. A continuación se presenta información adicional correspondiente a cada una de las grillas:

- La Grilla 1 fue construida mediante la digitalización de la Carta Náutica H-218. Cubre la totalidad del Golfo Nuevo y una porción exterior del mismo, abarcando un área de 120 km x 85 km. El espaciamiento entre nodos es de $\Delta x = \Delta y = 500$ m, con lo cual posee un número total de 240x170 nodos.
- La Grilla 2 se construyó con datos batimétricos extraídos de la Carta Náutica 92. Abarca una región de 7700 m x 5500 m, incluyendo la zona de Playa Kaiser y su entorno. El espaciamiento entre nodos es de $\Delta x = \Delta y = 100$ m, por lo que el número de nodos asciende a un total de 77x55.
- Por último, la Grilla 3 permite obtener información más detallada sobre el resultado de la modelación. Fue construida con la información batimétrica obtenida de los relevamientos realizados en la zona, abarcando un área de 1680 m x 2380 m que contiene al sector de emplazamiento del proyecto. El espaciamiento entre nodos es de $\Delta x = \Delta y = 10$ m, con lo cual suma un total de 168x238 nodos.

El acoplamiento de las grillas permite escribir el resultado de las simulaciones realizadas para la Grilla 1 sobre el contorno de la Grilla 2, sirviendo como dato de entrada para la segunda simulación, que a la vez genera los datos de entrada para la simulación sobre la Grilla 3, la cual permite obtener el resultado de la modelación sobre la zona de mayor detalle.

6.2.1 Propagación de olas oceánicas

La posibilidad del ingreso de olas oceánicas al Golfo Nuevo y su propagación hasta la zona de Playa Kaiser fue analizada mediante la aplicación de SWAN. La construcción de una grilla de cálculo extendida mar adentro, a varios kilómetros de la entrada al golfo, permite la modelación del oleaje en aguas profundas. Posteriormente, el anidado de grillas con mayor definición y la representación de los procesos de transformación de olas que incluye el modelo (descritos en 6.1) posibilitan obtener como resultado los valores espectrales del oleaje en la zona de emplazamiento del proyecto.

Para este estudio se analizaron tres casos particulares seleccionados del registro del **UKMO** de 5 años de mediciones (desde el 13/6/91 hasta el 31/10/96) correspondientes a un punto ubicado en aguas profundas, sobre las coordenadas: Lat: 43° 69' S y Long: 64° 38' W. Los eventos seleccionados para la simulación constituyen combinaciones de los máximos valores de Hs y T observados en el registro para cada una de la direcciones de interés, ellos son:

- Caso 1: Dirección SSE (105°) Hs=3.75 m Tp=16 s
- Caso 2: Dirección SE (135°) Hs=3.25 m Tp=16 s
- Caso 3: Dirección ESE (165°) Hs=3.25 m Tp=24 s

Las simulaciones realizadas consideran en todos los casos el nivel medio del mar N=3.00 m. El resultado de estos ensayos es presentado en las **Figuras 6.2 a 6.4**. Estas figuras muestran una importante reducción de las alturas de ola en las proximidades de la boca del golfo, manifestada en los gráficos por la concentración de las líneas de isoamplitud en esa zona.

Evidentemente, la estrechez de la boca y los cambios abruptos en las profundidades del lecho marino en ese sector generan fuertes procesos de disipación de energía del oleaje, produciendo una disminución notable en la altura de las olas que ingresan al golfo.

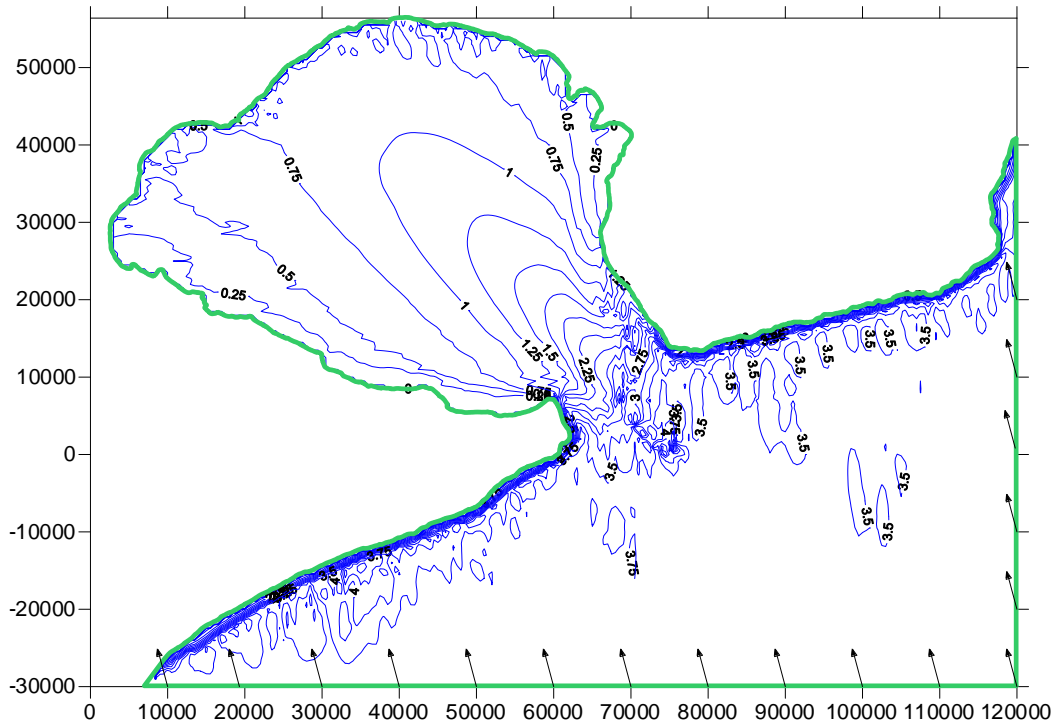


Figura 6.2. Propagación de olas oceánicas. Caso1: Dir=105° Hs=3.75 m Tp=16 s

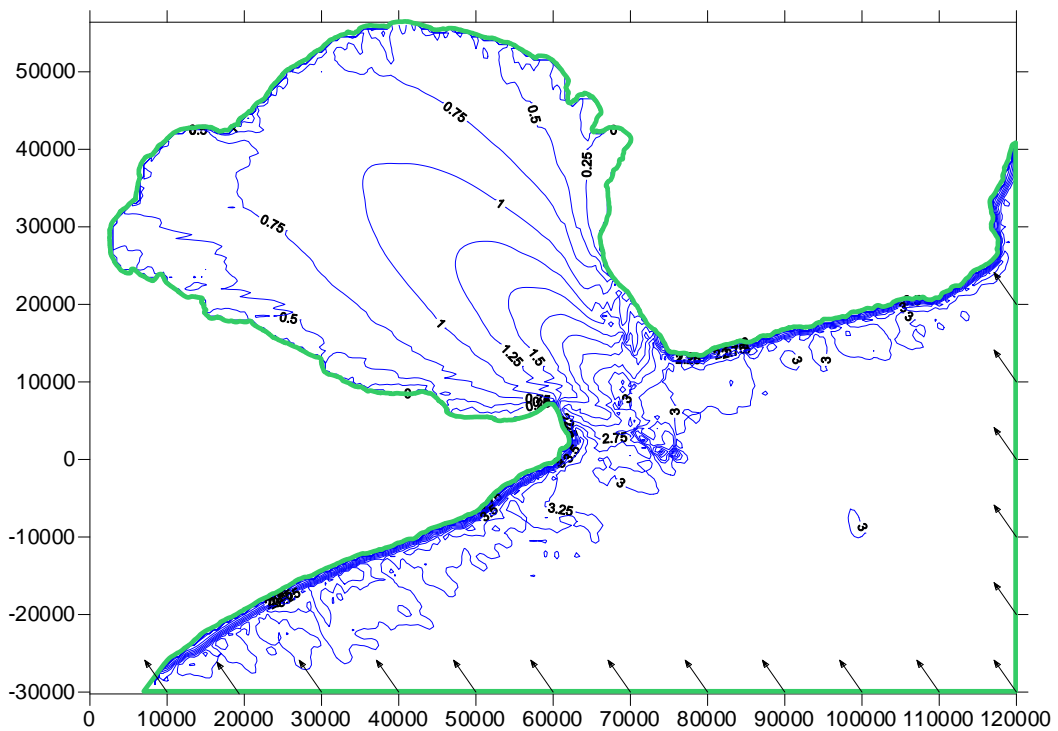
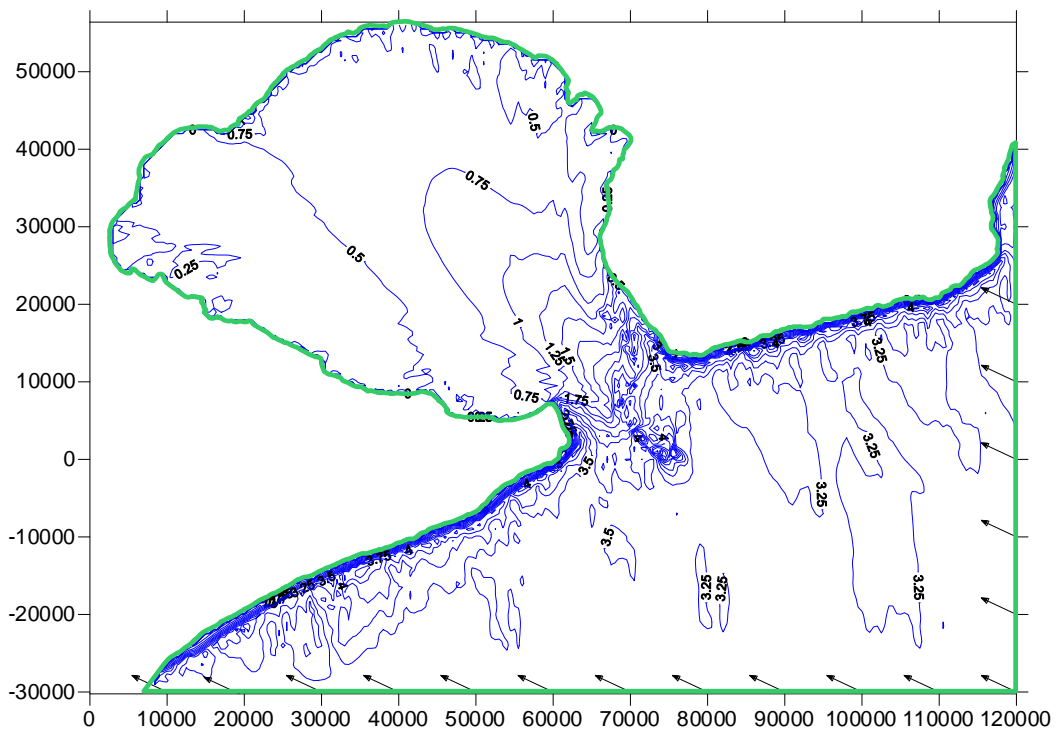


Figura 6.3. Propagación de olas oceánicas. Caso2: Dir=135° Hs=3.25 m Tp=16 s



Cabe aclarar que si bien no se cuenta con una serie de valores completa para vientos del Sudeste, con fines prácticos de obtener un resultado aproximado, para la simulación del oleaje en ésta dirección se utilizaron intensidades correspondientes al Este, ya que se observó una buena concordancia entre los valores de intensidad disponibles para ambas direcciones.

El objetivo principal de este análisis consistió en brindar información de base para los estudios posteriores de estabilidad de las estructuras de abrigo y de la agitación en el entorno del puerto y dentro del mismo. Por tal motivo, los resultados presentados en esta sección corresponden a valores de altura, período y dirección de olas en dos regiones diferentes del área modelada: la primera, ubicada sobre la frontera de la modelación numérica para el estudio de la agitación y, la segunda, ubicada a lo largo de un eje sobre el cual se proyecta la construcción de la escollera principal de abrigo.

Las **Tablas 6.1 a 6.4** presentan los resultados de interés para la modelación numérica de la agitación. Los valores de Hs, Tp y Dirección observados en estas tablas representan las características del oleaje incidente sobre una línea paralela a la costa, ubicada a una distancia aproximada de 150 metros mar adentro del morro de la escollera principal, sobre la isobata de 4.5 m.

Tabla 6.1. Resultado de las simulaciones con viento Norte

Escenario			Características del oleaje		
Orden	V (m/s)	N(m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
1	19.1	6.52	1.85	5.20	240
2	18.5	6.52	1.77	5.20	240
3	17.5	6.52	1.65	5.20	240
4	19.1	3.00	1.70	5.20	240
5	14.6	3.00	1.15	4.50	247
6	6.1	3.00	0.37	2.85	247
7	19.1	0.00	1.45	5.20	235

Tabla 6.2. Resultado de las simulaciones con viento Noreste

Escenario			Características del oleaje		
Orden	V (m/s)	N(m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
8	16.6	6.52	2.08	6.00	218
9	16.1	6.52	2.00	6.00	218
10	15.5	6.52	1.90	6.00	218
11	16.6	3.00	1.98	6.00	218
12	12.8	3.00	0.95	4.50	221
13	5.1	3.00	0.35	2.85	218
14	16.6	0.00	1.70	6.00	220

Tabla 6.3. Resultado de las simulaciones con viento Este

Escenario			Características del oleaje		
Orden	V (m/s)	N(m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
15	16.0	6.52	1.95	6.00	208
16	15.5	6.52	1.78	6.00	205
17	14.6	6.52	1.63	6.00	205
18	16.0	3.00	1.85	6.00	215
19	11.3	3.00	0.65	2.85	212
20	4.4	3.00	0.25	2.50	200
21	16.0	0.00	1.70	6.00	220

Tabla 6.4. Resultado de las simulaciones con viento Sudeste

Escenario			Características del oleaje		
Orden	V (m/s)	N(m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
22	16.0	6.52	1.10	7.00	198
23	16.0	3.00	1.10	6.00	203
24	11.3	3.00	0.35	4.50	173
25	4.4	3.00	0.20	2.50	173
26	16.0	0.00	0.90	6.00	205

En las **Tablas 6.5 a 6.8** se presentan los resultados de interés para el análisis de estabilidad de las obras de abrigo. Los escenarios simulados representan condiciones de viento con intensidades de 100 años de recurrencia (**Tabla 5.6**) y tres niveles de marea diferentes.

Los valores de Hs, Tp y Dirección observados en estas tablas corresponden a 3 ubicaciones puntuales coincidentes con la traza de la escollera principal, tal como muestra la **Figura 6.5**. Dicha figura, además, permite apreciar la topografía de la costa y la variación de profundidades en la zona modelada

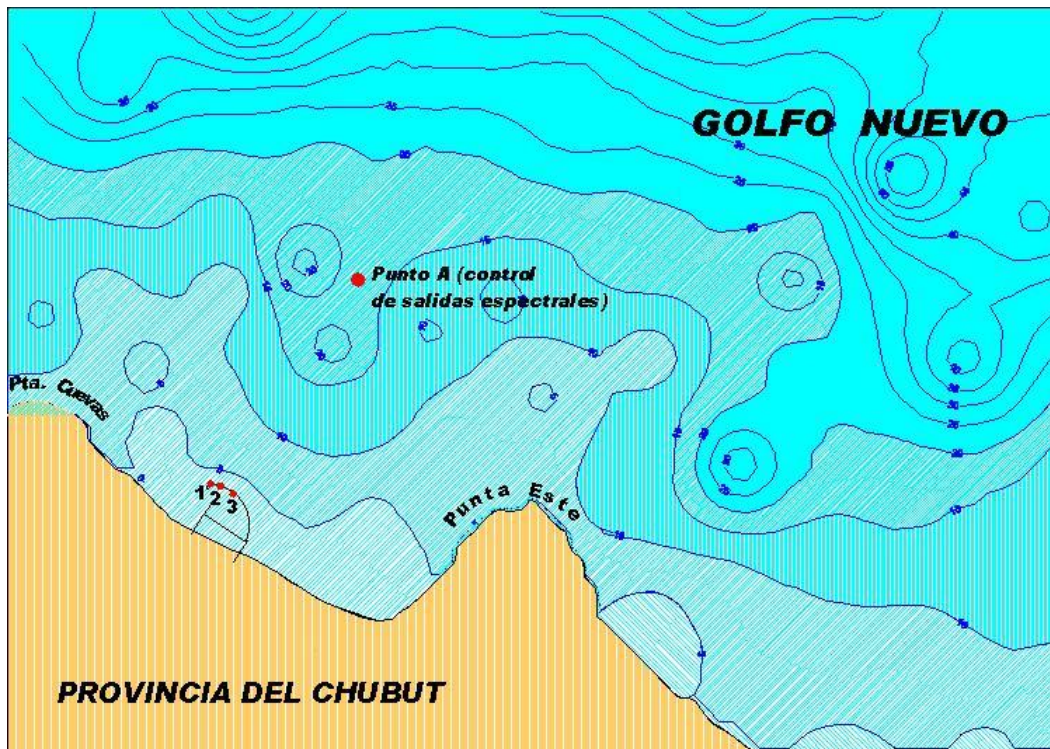


Figura 6.5. Zona de la modelación-Ubicación de puntos de interés.

Tabla 6.5. Olas incidentes sobre la escollera. Dirección Norte

Escenario simulado	Punto	Prof. (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
NORTE V=19.1m/s N=6.52m	1	9.8	1.82	5.20	240
	2	10.0	1.87	5.20	240
	3	10.3	1.89	5.20	241
NORTE V=19.1m/s N=3.00m	1	6.3	1.64	5.20	241
	2	6.5	1.75	5.20	240
	3	6.8	1.79	5.20	242
NORTE V=19.1m/s N=0.00m	1	3.3	1.31	5.20	234
	2	3.5	1.50	5.20	237
	3	3.8	1.49	5.20	241

Tabla 6.6. Olas incidentes sobre la escollera. Dirección Noreste

Escenario simulado	Punto	Prof. (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
NORESTE V=16.6m/s N=6.52m	1	9.8	2.05	6.00	218
	2	10.0	2.12	6.00	220
	3	10.3	2.14	6.00	221
NORESTE V=16.6m/s N=3.00m	1	6.3	1.90	6.00	221
	2	6.5	2.08	6.00	223
	3	6.8	2.09	6.00	225
NORESTE V=16.6m/s N=0.00m	1	3.3	1.41	6.00	221
	2	3.5	1.67	6.00	228
	3	3.8	1.61	6.00	232

Tabla 6.7. Olas incidentes sobre la escollera. Dirección Este

Escenario simulado	Punto	Prof. (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
ESTE V=16.0m/s N=6.52m	1	9.8	1.87	6.00	207
	2	10.0	1.92	6.00	208
	3	10.3	1.92	6.00	210
ESTE V=16.0m/s N=3.00m	1	6.3	1.73	6.00	210
	2	6.5	1.89	6.00	214
	3	6.8	1.91	6.00	216
ESTE V=16.0m/s N=0.00m	1	3.3	1.34	6.00	215
	2	3.5	1.64	6.00	222
	3	3.8	1.59	6.00	227

Tabla 6.8. Olas incidentes sobre la escollera. Dirección Sudeste

Escenario simulado	Punto	Prof. (m)	Hs (m)	Tp (s)	Dir. (°)
SUDESTE V=16.0m/s N=6.52m	1	9.8	1.26	7.00	196
	2	10.0	1.26	7.00	196
	3	10.3	1.23	7.00	197
SUDESTE V=16.0m/s N=3.00m	1	6.3	1.20	6.00	200
	2	6.5	1.22	6.00	201
	3	6.8	1.18	6.00	202
SUDESTE V=16.0m/s N=0.00m	1	3.3	0.99	6.00	205
	2	3.5	1.00	6.00	205
	3	3.8	0.92	6.00	206

A modo de contribución para la interpretación de los resultados de la modelación realizada con SWAN, en las **Figuras I.1 a I.3 del Anexo I**, se presentan tres casos (escenarios 4, 11 y 18) de los 26 escenarios simulados, correspondientes a las condiciones de viento y marea indicadas en las **Tablas 6.1 a 6.4**.

Estas figuras muestran el resultado de las simulaciones efectuadas con SWAN para la modelación del oleaje generado por acción del viento en la zona representada por la grilla de mayor detalle. Los resultados permiten interpretar las variaciones en la dirección y la altura de las olas a medida que éstas se propagan hacia la costa, poniendo de manifiesto la importancia de los procesos de refracción y rotura inducidos por los cambios en las profundidades del lecho marino.

6.2.3 Comparación entre olas oceánicas y olas generadas localmente

En virtud de los resultados obtenidos para la modelaciones presentados en 6.2.1 y 6.2.2 se realizó una comparación entre dos espectros de frecuencia representativos del oleaje oceánico ingresante al golfo y del oleaje generado dentro del mismo por acción de vientos locales, respectivamente.

Los espectros de frecuencia que se muestran en la **Figura 6.6** fueron obtenidos como resultado de la aplicación de SWAN para el punto A de la **Figura 6.5**, ubicado aproximadamente a 2400 metros de la costa, en las coordenadas Lat: 42° 46' S y Long: 64° 58' W.

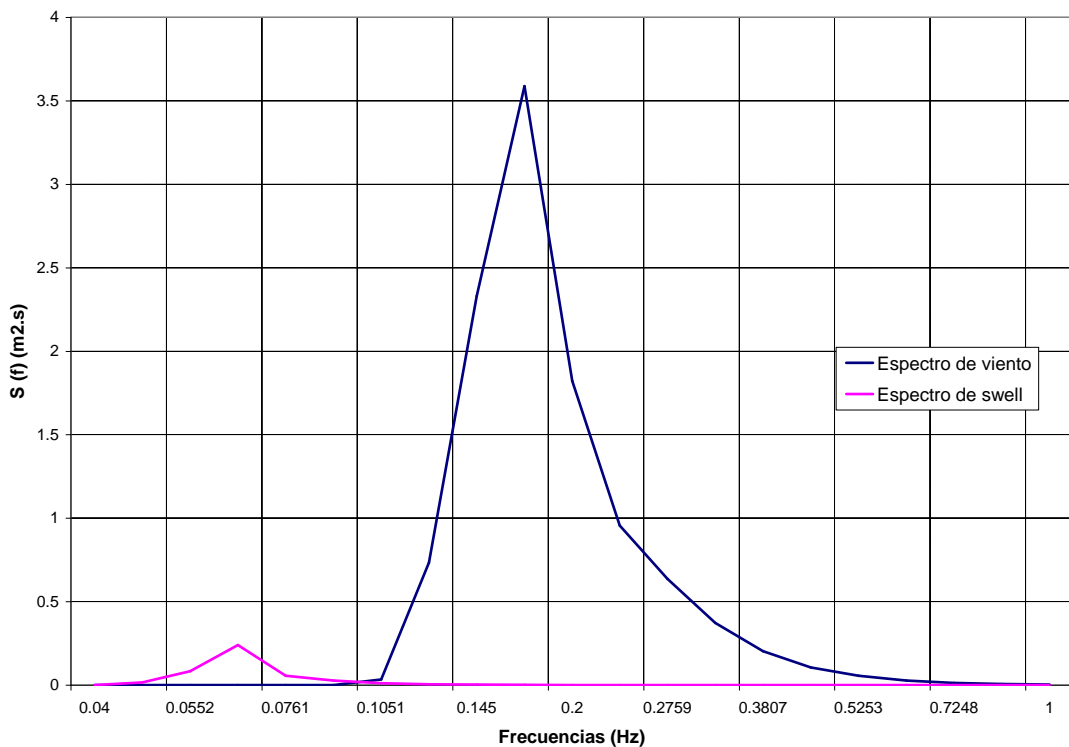


Figura 6.6 Comparación de espectros

El espectro de swell representa una ola de $H_s=0.24$ m y $T_p=20$ s, obtenida como resultado de la propagación de una onda oceánica de $H_s=3.25$ m y $T_p=24$ s (caso3). El espectro de viento posee valores de $H_s=2.35$ m y $T_p=6.0$ s, siendo generado por un viento del Noreste de 16.0 m/s. En ambos casos se consideró nivel medio del mar ($N=3.00$ m).

La **Figura 6.5** pone en evidencia las grandes diferencias existentes entre ambos espectros. La magnitud de las diferencias observadas indica que la generación de olas por acción de vientos locales constituye el factor dominante dentro de los procesos de aporte de energía al oleaje.

El resultado de esta comparación entre espectros justifica despreciar el efecto de las olas oceánicas para análisis de la agitación portuaria, presentado en la sección 7 de este informe. En el desarrollo de esta tarea se consideró, solamente, la acción del oleaje generado por los vientos locales.

7 MODELO MATEMÁTICO DE AGITACION EN EL AREA PORTUARIA

La modelación de la agitación del oleaje dentro del recinto portuario y en zonas aledañas tiene como principal objetivo la optimización de la configuración definitiva de la planta portuaria, sirviendo como herramienta para evaluar el funcionamiento de las distintas alternativas que se proponen.

Analizando distintos escenarios climáticos, conformados por la combinación de diferentes valores de altura de ola y nivel de la marea, se estudian las condiciones de oleaje producidas por la interacción entre las olas que se propagan hacia la costa y la presencia de las estructuras del puerto. El análisis del campo de olas resultante se utiliza para verificar el cumplimiento de las condiciones de agitación admisibles para la operación y el amarre de las embarcaciones para las cuales están destinadas las obras.

Consecuentemente, se estudiaron tres configuraciones portuarias diferentes, modificando dimensiones y orientación de la boca de acceso al puerto, con la intención de encontrar la solución más apropiada para satisfacer la necesidades del proyecto.

7.1 Metodología de cálculo

La simulación numérica de la agitación en un recinto portuario requiere de un modelo matemático relativamente sofisticado que debe contemplar los mecanismos dominantes de transformación de las olas: la difracción, la reflexión y la refracción. 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^{1,2}. 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 tal de ajustarse al contorno de la región de interés por una parte y, de tener un además un paso suficientemente pequeño respecto de la longitud de onda de la ola más corta, de modo de representarla adecuadamente. El contorno de la región de cálculo está caracterizada por bordes físicos coincidentes con tramos de costa, muelles, escolleras, u otras estructuras, y por bordes radiantes en los que se impone la condición de ola del caso, es decir su altura, período y dirección de propagación

Como solución, el modelo de Berkhoff provee la distribución espacial de alturas de ola en todo el interior de la red computacional, que es el resultado de interés ingenieril y, eventualmente, el campo de direcciones de propagación.

El LHA dispone del programa *DIFRAC*³, que tiene implementada la metodología descrita. Más detalles técnicos de este tipo de modelo se presentan en el **Anexo IV**.

El modelo de Berkhoff puede ser aplicado a olas que responden a una distribución espectral en frecuencia apelando al principio de superposición, dado el carácter lineal de las ecuaciones. Para ello los espectros se discretizan y se obtienen soluciones para todas las combinaciones de

frecuencias. La solución final resulta de la suma de las soluciones particulares para cada banda de frecuencia en que se ha discretizado el espectro.

Para el espectro de frecuencia se utilizó la expresión del **Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)**⁴ que proporciona una relación funcional entre la densidad de energía $S(f)$ contenida en un entorno infinitamente pequeño de la frecuencia f :

$$S(f) = \beta_j H_{1/3}^2 \gamma^3 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}(T_p f)^{-4}\right] \cdot \gamma^{\exp\left[-\left(\frac{f}{f_p}-1\right)^2 / 2\sigma^2\right]} \quad (1)$$

donde

$$\beta_j = \frac{0.06238}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \cdot \ln \gamma]$$

$H_{1/3}$ es la altura significativa (una medida de la energía total contenida), T_p el período de pico espectral ($T_p = 1/f_p$), $\sigma = 0.07$ para frecuencias menores que la de pico y $\sigma = 0.09$ para frecuencias mayores; γ es el coeficiente de apuntamiento del espectro, variable entre 1 y 7 y con un valor promedio de 3,3, que es el que se ha adoptado en el presente estudio.

7.2 Implementación del modelo

7.2.1 Red de elementos finitos

Se generó una red de elementos finitos para cada una de las configuraciones portuarias analizadas. Las dimensiones de los elementos que conforman la malla de cálculo son determinadas por la necesidad contar con un mínimo de 5 elementos por longitud de las ondas modeladas.

Para una adecuada resolución del problema se adoptó una malla computacional compuesta de aproximadamente 100.000 elementos triangulares que cubrieron un área del orden de 150.000 m². A cada elemento se le asignó la profundidad correspondiente, de acuerdo a la batimetría utilizada.

Los contornos del área de cálculo están compuestos por límites físicos (muelles, escolleras) y por bordes matemáticos. Los primeros, poseen determinadas propiedades reflejantes para las ondas que inciden sobre los mismos. El coeficiente de absorción α , requerido por el sistema DIFRAC, se vincula con el coeficiente de reflexión K_r mediante:

$$\alpha = \frac{1 - K_r}{1 + K_r} \quad (2)$$

En esta aplicación se adoptaron los valores de $\alpha=0.5$ ($K_r=0.33$) y $\alpha=0$ ($K_r=1$), para los contornos de escollera y tablestacado, respectivamente. Estos valores fueron seleccionados en función de las características geométricas de dichos bordes, tomando como fuente de información resultados de ensayos realizados en condiciones similares.

Los bordes matemáticos son tratados como fronteras radiantes, lo que significa que la energía de olas puede entrar al dominio de cálculo a través de ellos (mediante la imposición de un valor de altura, período y dirección) o ser radiada hacia el exterior.

7.2.2 Representación del espectro de olas incidentes

Para cada escenario estudiado se construyó el espectro de frecuencia según la expresión del espectro JONSWAP con un coeficiente de apuntamiento $\gamma = 3.3$. La altura significativa H_s puede definirse a partir de la función de densidad espectral como:

$$H_s = 4 m_o^{1/2} \quad (3)$$

donde m_o es el momento de orden cero de la función de densidad de energía $S(f)$, y se define como:

$$m_o = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (4)$$

El espectro fue discretizado en 16 bandas de frecuencia. La elección de la cantidad de bandas de frecuencia de discretización del espectro es una solución de compromiso entre el tiempo de cálculo (cada banda de frecuencia requiere ser resuelta separadamente) y la resolución del espectro, que mejora con mayor cantidad de bandas.

Tanto por la necesidad práctica de establecer frecuencias de corte mínimas y máximas, como por el hecho de discretizar el espectro en un número relativamente reducido de bandas de frecuencia, los valores de m_o y de H_s resultan aproximados respecto de los valores originales utilizados en la determinación de la función teórica $S(f)$.

7.3 Escenarios de cálculo

Los escenarios de análisis utilizados para el estudio de la agitación por oleaje fueron obtenidos a partir de la aplicación del modelo de generación de olas. De la grilla de cálculo construida para las simulaciones de SWAN se extrajeron valores de altura, período y dirección de olas correspondientes a la región en la que se ubica la frontera de radiación del modelo DIFRAC.

Los escenarios analizados corresponden a condiciones extremas y condiciones medias del viento, combinados con valores de mareas asociados a niveles medios, pleamar y bajamar. Los valores de H_s , T_p y dirección, correspondientes a cada escenario de análisis, fueron presentados en las **Tablas 6.1 a 6.4** y son utilizados como dato de entrada para la modelación de DIFRAC en cada una de las configuraciones portuarias analizadas.

7.4 Resultados

En esta sección se evalúan dos configuraciones portuarias distintas con una alternativa de modificación para cada una de ellas, siendo denominadas como: Configuración I, Configuración Ib, Configuración II y Configuración IIb.

Los resultados del análisis de la agitación se presentan, por una parte en forma gráfica, como líneas de isoamplitud en el área modelada, y por otra parte, en formato de tabla, donde se vuelcan los valores de Hs calculados para un conjunto de puntos de interés seleccionados por su ubicación.

7.4.1 Configuración I

La configuración propuesta inicialmente para la planta portuaria del proyecto es presentada en la **Figura 7.1 (Anexo II)**. El sector destinado al amarre de las embarcaciones se encuentra protegido de la acción del oleaje por una escollera de enrocado que presenta una extensión de 530 m y un muro vertical de cajones premoldeados de aproximadamente 160 m. El proyecto prevé un área de relleno de 5.3 Has. que ingresa en el mar unos 155 m desde la línea de costa, con lo cual, la zona de muelles flotantes, destinados al amarre de embarcaciones, se extiende a partir de la isobata de 0.00 m.

En función de los requerimientos explicados anteriormente, para la modelación numérica del problema se definió un área de 150.000 m² delimitada por el contorno presentado en la **Figura 7.2**. La figura muestra, además, la ubicación de los puntos de interés seleccionados particularmente para evaluar la altura de ola y para la confección de tablas con valores puntuales de Hs.

Utilizando los escenarios de cálculo presentados en la **Tabla 7.1** se realizaron tres ensayos utilizando el modelo DIFRAC correspondientes a situaciones de olas generadas por vientos de intensidades de recurrencia de 100 años, para las direcciones N, E y NE, con nivel medio del mar en todos los casos (N=3.00m).

Tabla 7.1. Escenarios utilizados en la modelación. Datos de entrada para DIFRAC

Dirección de Incidencia	Orden	Hs (m)	Tp (s)	N (m)	Dir. (°)
NORTE	1	1.70	5.20	3.00	240
NORESTE	2	1.98	6.00	3.00	218
ESTE	3	1.85	6.00	3.00	215

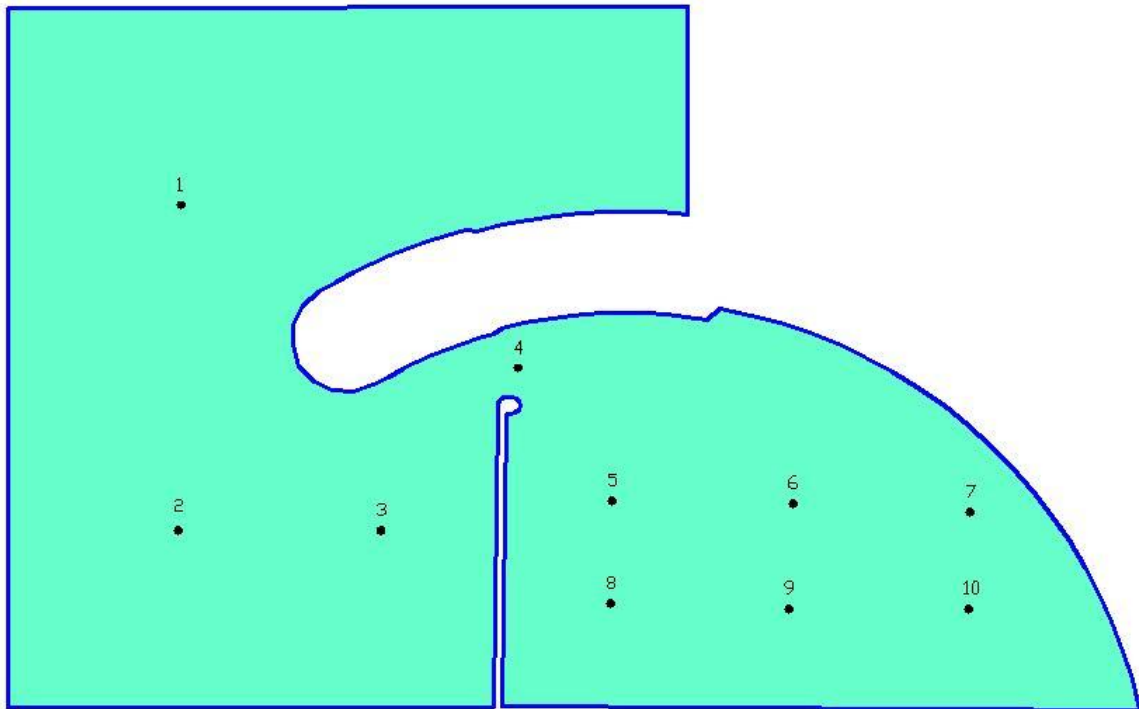


Figura 7.2. Contorno del área de modelación para la Configuración I.

Los resultados de las simulaciones realizadas se presentan en la **Tabla 7.2**, en la cual figuran los valores de H_s en 10 puntos pertenecientes a la malla de cálculo para cada uno de los escenarios analizados. Las **Figuras I.1 a I.3**, ubicadas en el **ANEXO III**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada.

Tabla 7.2. Valores puntuales de H_s (m) para las simulaciones realizadas

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado		
		NORTE	NORESTE	ESTE
Exterior del puerto	1	1.58	2.19	2.11
	2	1.38	1.49	1.11
	3	1.28	0.71	0.67
Boca de acceso	4	0.51	0.51	0.56
Zona de amarre	5	0.12	0.40	0.63
	6	0.47	0.44	0.65
	7	0.50	0.39	0.42
	8	0.96	0.57	0.55
	9	0.20	0.90	0.76
	10	0.46	0.55	0.72

En los tres casos de estudio presentados se observa una importante amplificación de los valores de H_s en el interior del recinto portuario, provocando condiciones de agitación que comprometen la seguridad de las embarcaciones. Estos resultados ponen en evidencia un efecto de resonancia producido por la oscilación de las ondas incidentes dentro de la dársena del puerto, lo cual señala la necesidad de realizar modificaciones en la geometría portuaria con el fin de evitar la amplificación de las olas, manteniendo los valores de H_s por debajo del umbral de aceptación previsto para el tipo embarcación de diseño ($H_s < 0.40$ m).

Se realizó un análisis individual para cada una de las componentes de frecuencia de los espectro utilizados con el fin de identificar los períodos de onda que producen mayor amplificación del oleaje. Para esto, se llevó a cabo un conjunto de simulaciones considerando una ola monocromática de $H_s = 1$ m y 16 períodos distintos, abarcando por completo el rango de valores utilizado en los espectros analizados. La **Figura 7.3** se presenta como ejemplo del resultado de dicho procedimiento, ilustrando el análisis de un caso correspondiente a olas provenientes del Este con un nivel medio del mar ($N = 3.00$ m).

La **Figura 7.3** muestra, gráficamente, valores correspondientes a la relación H_s/H_o (con $H_o = 1$ m) en función del período de onda T para tres ubicaciones puntuales del puerto: un punto exterior (punto3) y dos puntos ubicados dentro del recinto portuario (punto5 y punto10). La ubicación de estos puntos puede verse en la **Figura 7.2**.

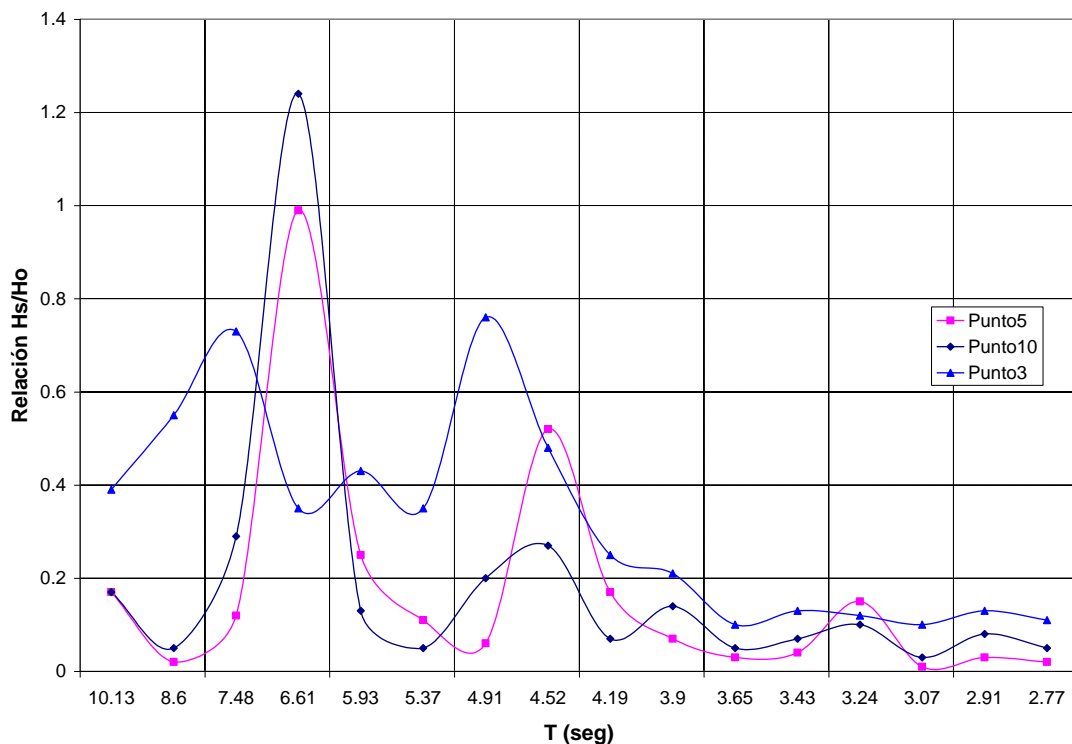


Figura 7.3. Análisis de amplificación para las componentes del espectro

Los gráficos indican mayor amplificación de las olas en los puntos ubicados en el interior del puerto, destacándose, claramente, el período de $T=6.61$ s. como el que causante de la mayor amplificación de las ondas. Recordando que el espectro de frecuencias utilizado para la modelación del oleaje de olas provenientes del Este y del Noreste posee un período pico de $T_p=6$ s., el resultado de este análisis permite explicar los elevados valores de H_s observados en el interior del puerto para las simulaciones presentadas anteriormente (**Figuras I.1 a I.3**).

Los resultados obtenidos manifiestan la necesidad de realizar la búsqueda de alternativas del proyecto que permitan evitar el efecto de la amplificación de las ondas dentro del puerto. Por tal motivo, a continuación se presentan tres nuevos casos de estudio, consistentes en una modificación al proyecto presentado (Configuración Ib) y una nueva configuración portuaria con dos orientaciones diferentes (Configuración II y IIb).

7.4.2 Configuración Ib

La alternativa propuesta para modificación de la planta portuaria consiste en el acortamiento del muro vertical de cajones premoldeados que contribuye al cierre lateral de acceso al puerto.

Esta idea se encuentra fundamentada por las experiencias realizadas por Vionnet^{5,6}, donde se señala que “la magnitud del factor de amplificación depende del equilibrio entre el flujo entrante y el eficazmente radiado al infinito a través de la boca del recinto y, por lo tanto, es función del ancho de la misma. Luego, el proceso de radiación de energía limita el crecimiento de radiación de la onda en el interior del recinto”.

Consecuentemente, la nueva configuración adoptada para la planta del puerto difiere de la configuración original sólo en la longitud del muro, el cual pasa a medir 107 m en lugar de los 160 m iniciales. De esta manera se produce un incremento importante en la apertura de la boca del recinto, con lo que se busca aumentar la radiación de energía hacia el exterior para disminuir los efectos de amplificación de las ondas. **La Figura 7.4 (Anexo II)** muestra el esquema de la configuración adoptada.

Tanto el área de modelación como la definición de los contornos utilizados para las simulaciones siguen siendo la mismas que se utilizaron para la **Configuración I**, con la salvedad de reducción en la longitud del muro. **La Figura 7.5** muestra el esquema adoptado para la modelación numérica correspondiente a esta nueva configuración.

Sobre esta configuración se realizaron 15 simulaciones correspondientes a los escenarios definidos por los resultados de la aplicación de SWAN. **La Tabla 7.3** presenta el resumen de los escenarios analizados en esta sección

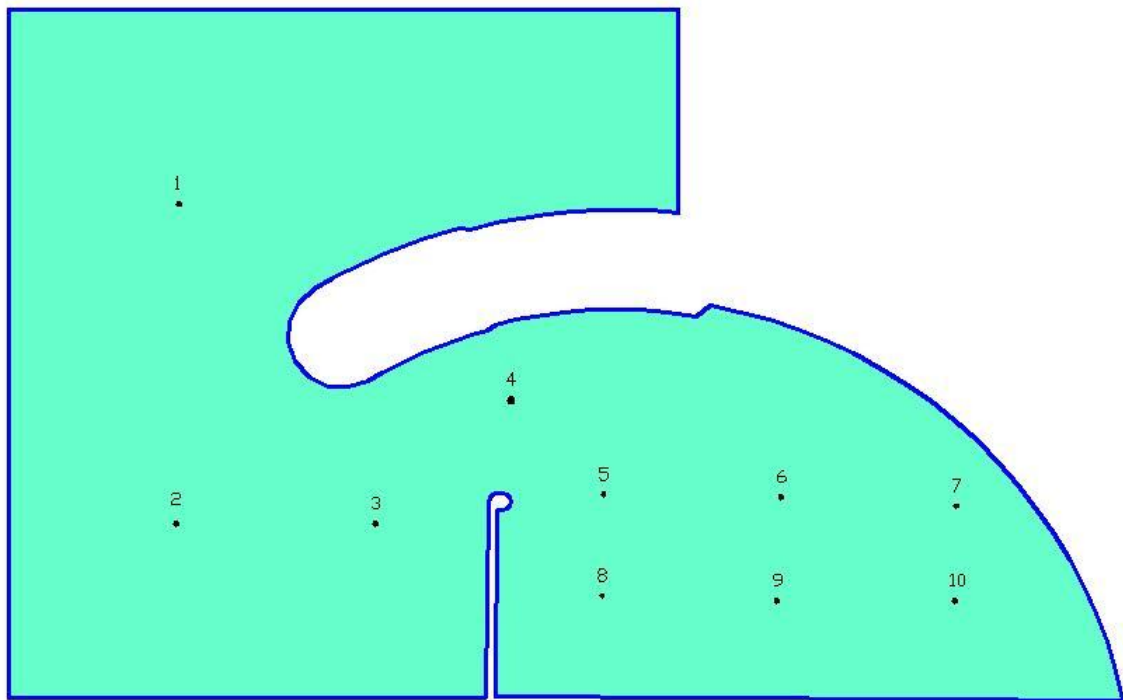


Figura 7.5. Contorno del área de modelación para la Configuración Ib.

Tabla 7.3. Escenarios utilizados en la modelación

Dirección de Incidencia	Orden	Hs (m)	Tp (s)	N (m)	Dir. (°)
NORTE	1	1.85	5.20	6.52	240
	2	1.70	5.20	3.00	240
	3	1.45	5.20	0.00	235
	4	1.15	4.50	3.00	249
	5	0.37	2.85	3.00	247
NORESTE	6	2.08	6.00	6.52	218
	7	1.98	6.00	3.00	218
	8	1.70	6.00	0.00	220
	9	0.95	4.50	3.00	231
	10	0.35	2.85	3.00	218
ESTE	11	1.95	6.00	6.52	208
	12	1.85	6.00	3.00	215
	13	1.70	6.00	0.00	220
	14	0.65	2.85	3.00	212
	15	0.25	2.50	3.00	200

Los resultados de las simulaciones realizadas se presentan en las **Tablas 7.4 a 7.6**, donde se encuentran, separadamente para cada una de las direcciones de incidencia analizadas, los valores de Hs para los 10 puntos de cálculo definidos anteriormente (**Figura 7.5**). Las **Figuras Ib.1 a Ib.9**, ubicadas en el **ANEXO III**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada.

Tabla 7.4. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Norte

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		1	2	3	4	5
Exterior del puerto	1	1.42	1.17	1.01	0.94	0.18
	2	1.80	1.24	1.03	1.08	0.28
	3	0.25	0.49	0.59	0.38	0.11
Boca de acceso	4	0.09	0.12	0.20	0.07	0.05
Zona de amarre	5	0.05	0.08	0.16	0.09	0.03
	6	0.04	0.05	0.16	0.06	0.03
	7	0.03	0.05	0.16	0.05	0.02
	8	0.02	0.04	0.10	0.08	0.01
	9	0.03	0.06	0.13	0.11	0.01
	10	0.03	0.06	0.14	0.05	0.02

Tabla 7.5. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Noreste

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		6	7	8	9	10
Exterior del puerto	1	1.66	1.68	1.60	0.88	0.20
	2	1.21	1.61	1.46	0.95	0.19
	3	0.19	0.56	0.68	0.25	0.06
Boca de acceso	4	0.08	0.22	0.22	0.10	0.03
Zona de amarre	5	0.04	0.06	0.16	0.07	0.02
	6	0.03	0.03	0.11	0.04	0.01
	7	0.03	0.04	0.13	0.04	0.01
	8	0.03	0.03	0.09	0.04	0.00
	9	0.03	0.06	0.12	0.06	0.01
	10	0.03	0.05	0.11	0.05	0.01

Tabla 7.6. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Este

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		11	12	13	14	15
Exterior del puerto	1	1.44	1.56	1.60	0.61	0.13
	2	0.72	1.36	1.46	0.26	0.03
	3	0.15	0.51	0.68	0.08	0.04
Boca de acceso	4	0.09	0.20	0.22	0.06	0.02
Zona de amarre	5	0.03	0.10	0.16	0.04	0.01
	6	0.02	0.04	0.11	0.02	0.00
	7	0.02	0.04	0.13	0.02	0.00
	8	0.02	0.03	0.09	0.03	0.00
	9	0.02	0.06	0.12	0.02	0.00
	10	0.02	0.06	0.11	0.01	0.00

El resultado de las simulaciones realizadas muestra la ausencia de los efectos de amplificación de las ondas observados en el análisis de la **Configuración I**. En efecto, en las **Figuras Ib.1 a Ib.9** se puede apreciar la homogeneidad en los valores de Hs dentro del recinto para la totalidad de los escenarios simulados. A diferencia de lo visto en las **Figuras I.1 a I.3**, para la **Configuración Ib**, el oleaje en el sector de amarre resulta inferior a 0.2 m para cualquier ubicación que se desee especificar.

Los valores de Hs que figuran en las **Tablas 7.4 a 7.6** permiten realizar una comparación puntual entre las alturas de ola en la zona de amarre y en el exterior del puerto. Estos resultados dan cuenta del grado de atenuación de la agitación producido por la presencia de las estructuras de abrigo, observándose importantes diferencias entre los valores de Hs correspondientes a los puntos 1 a 4 (exterior) y los correspondientes a los puntos 5 a 10 (interior del puerto) para todos los casos estudiados.

Con el conjunto de escenarios analizados en esta sección se obtuvieron los patrones que describen las características de la agitación en la zona del puerto para condiciones medias y condiciones extremas del oleaje.

La modelación de las condiciones medias permite conocer los valores de alturas de ola que con mayor frecuencia deberán afrontar las embarcaciones para sus operaciones en las proximidades del puerto y dentro del mismo. El análisis de la agitación para condiciones extremas del oleaje demuestra que la **Configuración Ib** puede garantizar la seguridad de las embarcaciones durante la ocurrencia de temporales intensos, asegurando que la altura de las olas dentro del recinto portuario permanece por debajo del valor de Hs=0.20 m.

7.4.3 Configuración II

La segunda alternativa de proyecto diseñada para superar los inconvenientes observados en la **Configuración I** propone el estudio de una nueva planta portuaria. Tal como puede observarse en la **Figura 7.6 (Anexo II)**, la **Configuración II** presenta cambios sustanciales en geometría del puerto respecto del diseño original.

En primer lugar, se prevé un cambio en la curvatura y la extensión de la escollera principal, la cual pasa a medir 554.5 m en lugar de los 530 m previstos originalmente. El área de relleno de 5.3 Has. se mantiene, pero ahora ingresa en el mar unos 190 m desde la línea de costa, permitiendo que la zona de muelles flotantes se extienda a partir de la isobata de 0.50 m. El muro vertical de cajones premoldeados posee una extensión de 112.5 m, ampliándose considerablemente la boca del recinto en relación a la planta original.

Las modificaciones previstas para la configuración portuaria hacen necesaria la confección de una nueva malla de cálculo para la modelación numérica. Siguiendo los requerimientos explicados en 7.2 se definió un área de 150.000 m² delimitada por el contorno presentado en la **Figura 7.7**. La figura muestra, además, la ubicación de los puntos de interés seleccionados particularmente para la evaluación de la altura de ola y la confección de tablas con valores puntuales de Hs.

Para el análisis de la agitación por oleaje en la **Configuración II** se repitieron los mismos ensayos numéricos realizados en el estudio de la **Configuración Ib**. El resumen de los escenarios simulados se presenta en la **Tabla 7.7**.

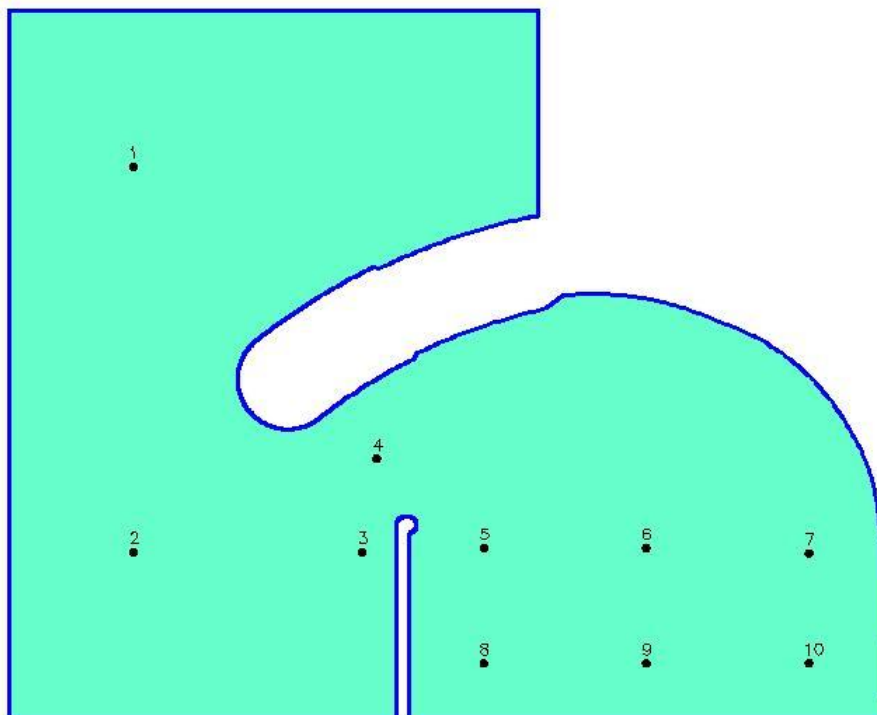


Figura 7.7. Contorno del área de modelación para la Configuración II.

Tabla 7.7. Escenarios utilizados en la modelación

Dirección de Incidencia	Orden	Hs (m)	Tp (s)	N (m)	Dir. (°)
NORTE	1	1.85	5.20	6.52	240
	2	1.70	5.20	3.00	240
	3	1.45	5.20	0.00	235
	4	1.15	4.50	3.00	249
	5	0.37	2.85	3.00	247
NORESTE	6	2.08	6.00	6.52	218
	7	1.98	6.00	3.00	218
	8	1.70	6.00	0.00	220
	9	0.95	4.50	3.00	231
	10	0.35	2.85	3.00	218
ESTE	11	1.95	6.00	6.52	208
	12	1.85	6.00	3.00	215
	13	1.70	6.00	0.00	220
	14	0.65	2.85	3.00	212
	15	0.25	2.50	3.00	200

Los resultados de las simulaciones realizadas se presentan en las **Tablas 7.8 a 7.10**, donde se encuentran, separadamente para cada una de las direcciones de incidencia analizadas, los valores de Hs para los 10 puntos de cálculo definidos anteriormente (**Figura 7.6**). Las **Figuras II.1 a II.9**, ubicadas en el **ANEXO III**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada.

Tabla 7.8. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Norte

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		1	2	3	4	5
Exterior del puerto	1	1.64	2.11	1.95	1.23	0.26
	2	1.16	1.10	1.16	0.87	0.22
	3	0.04	0.03	0.06	0.03	0.00
Boca de acceso	4	0.10	0.10	0.23	0.12	0.02
Zona de amarre	5	0.07	0.06	0.09	0.07	0.01
	6	0.08	0.07	0.08	0.06	0.01
	7	0.06	0.05	0.08	0.05	0.00
	8	0.04	0.03	0.06	0.03	0.00
	9	0.06	0.04	0.08	0.05	0.01
	10	0.06	0.04	0.09	0.04	0.01

Tabla 7.9. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Noreste

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		6	7	8	9	10
Exterior del puerto	1	1.53	1.45	1.18	1.29	0.21
	2	1.81	1.48	1.19	1.06	0.28
	3	0.03	0.05	0.07	0.02	0.00
Boca de acceso	4	0.08	0.15	0.29	0.08	0.03
Zona de amarre	5	0.05	0.06	0.11	0.03	0.00
	6	0.04	0.06	0.09	0.03	0.00
	7	0.04	0.06	0.06	0.03	0.01
	8	0.04	0.04	0.05	0.02	0.00
	9	0.05	0.04	0.10	0.02	0.00
	10	0.04	0.06	0.08	0.03	0.00

Tabla 7.10. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Este

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		11	12	13	14	15
Exterior del puerto	1	1.37	1.20	1.18	0.58	0.13
	2	0.94	1.21	1.19	0.55	0.03
	3	0.02	0.05	0.07	0.01	0.00
Boca de acceso	4	0.13	0.14	0.29	0.05	0.02
Zona de amarre	5	0.04	0.07	0.11	0.01	0.00
	6	0.03	0.06	0.09	0.01	0.00
	7	0.02	0.06	0.06	0.01	0.00
	8	0.03	0.03	0.05	0.01	0.00
	9	0.03	0.04	0.10	0.01	0.00
	10	0.04	0.06	0.08	0.01	0.00

En el análisis de los resultados debe destacarse en, primer lugar, que tal como ocurría con la **Configuración Ib** no existen evidencias de amplificación del oleaje dentro del recinto portuario para ninguna de las simulaciones realizadas. Consecuentemente, las **Figuras II.1 a II.9** dan cuenta de la homogeneidad de los valores de altura de ola dentro del recinto, mostrando que Hs se mantiene por debajo del umbral de 0.20 m para todos los casos.

Otro resultado relevante que surge, tanto del análisis de las figuras como de la observación de los valores puntuales presentados en las tablas, es la importancia del grado de atenuación del oleaje producido por las estructuras de abrigo. Las diferencias entre los valores de Hs en el exterior y en el interior del puerto señalan la eficacia del diseño y ponen de manifiesto la seguridad de las embarcaciones amarradas dentro del puerto durante la ocurrencia de temporales intensos.

La comparación entre los resultados obtenidos en **7.4.2** y **7.4.3** muestra una gran paridad en la respuesta de las **Configuraciones Ib y II** frente a la ocurrencia de los escenarios analizados. Ambas configuraciones muestran ser eficaces para atenuar el oleaje que se propaga desde aguas profundas hacia la costa, brindando seguridad a las embarcaciones amarradas en su interior. Desde el punto de vista del análisis de la agitación no existen diferencias apreciables que puedan justificar la elección de alguna de estas configuraciones en desmedro de la otra.

7.4.4 Configuración III

La última de las alternativas de proyecto evaluadas en este informe mantiene la forma y las dimensiones de la **Configuración II**, pero las obras de abrigo se invierten en forma especular sobre un eje perpendicular a la costa. De esta manera, la boca del puerto queda orientada hacia el Este, tal como puede observarse en la **Figura 7.8 (Anexo II)**.

La **Figura 7.9** muestra el contorno que define el área de cálculo para la nueva modelación, junto con la ubicación de 10 puntos seleccionados para el análisis particular de las alturas de ola.

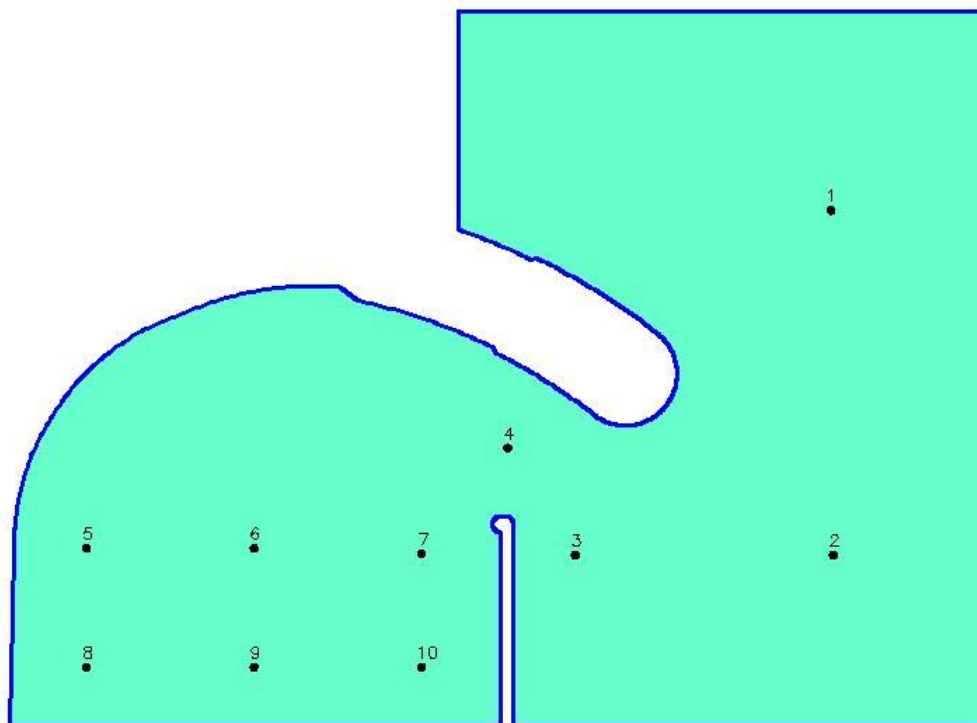


Figura 7.9. Contorno del área de modelación para la Configuración III.

El cambio de orientación en las obras de abrigo motiva la necesidad de modificar el conjunto de escenarios de análisis para el estudio de la agitación producida por el oleaje. Por tal motivo, manteniendo el número de simulaciones realizadas para las dos configuraciones portuarias que anteceden, se analizará la incidencia de las olas del Sudeste en lugar de las incidentes desde el Norte. El conjunto de escenarios analizados para la **Configuración III** es presentado en la **Tabla 7.11**.

Tabla 7.11. Escenarios utilizados en la modelación

Dirección de Incidencia	Orden	Hs (m)	Tp (s)	N (m)	Dir. (°)
NORESTE	1	2.08	6.00	6.52	218
	2	1.98	6.00	3.00	218
	3	1.70	6.00	0.00	220
	4	0.95	4.50	3.00	231
	5	0.35	2.85	3.00	218
ESTE	6	1.95	6.00	6.52	208
	7	1.85	6.00	3.00	215
	8	1.70	6.00	0.00	220
	9	0.65	2.85	3.00	212
	10	0.25	2.50	3.00	200
SUDESTE	11	1.10	7.00	6.52	205
	12	1.10	6.00	3.00	203
	13	0.90	6.00	0.00	198
	14	0.35	4.50	3.00	173
	15	0.20	2.50	3.00	173

Nuevamente, los resultados de las simulaciones se presentan en las **Tablas 7.12 a 7.14**, donde se encuentran, separadamente para cada una de las direcciones de incidencia analizadas, los valores de Hs para los 10 puntos de cálculo definidos anteriormente (**Figura 7.9**). Las **Figuras III.1 a III.9**, ubicadas en el **ANEXO III**, muestran los mismos resultados en forma gráfica, permitiendo apreciar la distribución de la altura de olas para la totalidad del área modelada.

Tabla 7.12. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Norestete

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		1	2	3	4	5
Exterior del puerto	1	1.39	1.07	1.53	0.95	0.20
	2	1.34	1.27	0.78	0.88	0.19
	3	0.66	0.73	0.31	0.32	0.05
Boca de acceso	4	0.14	0.18	0.11	0.12	0.02
Zona de amarre	5	0.08	0.13	0.05	0.05	0.01
	6	0.11	0.17	0.06	0.07	0.01
	7	0.13	0.15	0.07	0.07	0.01
	8	0.08	0.12	0.06	0.07	0.01
	9	0.10	0.12	0.06	0.04	0.01
	10	0.09	0.08	0.04	0.05	0.00

Tabla 7.13. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Este

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		6	7	8	9	10
Exterior del puerto	1	1.17	1.25	1.50	0.64	0.12
	2	0.90	1.23	0.70	0.52	0.11
	3	0.83	0.82	0.36	0.29	0.06
Boca de acceso	4	0.17	0.17	0.13	0.07	0.01
Zona de amarre	5	0.10	0.13	0.04	0.06	0.01
	6	0.11	0.22	0.07	0.06	0.02
	7	0.12	0.16	0.07	0.06	0.02
	8	0.09	0.13	0.07	0.05	0.01
	9	0.11	0.15	0.06	0.04	0.01
	10	0.08	0.10	0.04	0.02	0.01

Tabla 7.14. Valores puntuales de Hs (m) para las simulaciones de incidencia Sudeste

Ubicación	Punto N°	Escenario simulado				
		11	12	13	14	15
Exterior del puerto	1	1.00	0.69	1.12	0.41	0.20
	2	0.31	0.36	0.54	0.20	0.17
	3	0.91	0.41	0.22	0.27	0.27
Boca de acceso	4	0.24	0.10	0.10	0.20	0.11
Zona de amarre	5	0.12	0.06	0.02	0.05	0.04
	6	0.14	0.09	0.03	0.09	0.05
	7	0.14	0.09	0.04	0.08	0.06
	8	0.13	0.07	0.04	0.08	0.05
	9	0.16	0.06	0.03	0.06	0.04
	10	0.10	0.04	0.02	0.02	0.02

Como era esperable, dado que la geometría de la planta portuaria es la misma que la de la **Configuración II**, en este caso tampoco aparecen indicios de amplificación del oleaje dentro del recinto, donde sigue observándose la uniformidad de los valores de Hs.

Al igual que en las dos configuraciones analizadas anteriormente, siguen existiendo grandes diferencias entre los valores de alturas de ola en el exterior y en el interior del puerto. Esto indica, nuevamente, la eficacia de las obras de abrigo previstas para la atenuación del oleaje.

Comparando los valores de Hs presentados en las **Tablas 7.12 a 7.14** con los valores correspondientes al análisis realizado para las **Configuraciones Ib y II** se puede apreciar que en la zona de amarre de las embarcaciones la **Configuración III** presenta alturas de ola levemente superiores a las otras dos. Sin embargo, siendo Hs=0.22 m. el máximo valor observado en dicho caso, puede considerarse que esta configuración portuaria brinda, también,

seguridad a las embarcaciones amarradas en su interior durante la ocurrencia de temporales intensos.

8 CONCLUSIONES

En este informe se realizó un análisis estadístico de los registros de vientos obtenidos por el **CENPAT** para la ciudad de Puerto Madryn. Los resultados de dicho análisis permitieron establecer condiciones medias y extremas de intensidad del viento para distintas direcciones de incidencia, constituyendo la información de base para el análisis del clima de olas en la zona de emplazamiento del proyecto.

Mediante la aplicación del modelo **SWAN** se estudió la propagación del oleaje hacia las costas de Playa Kaiser. Se observó que las olas oceánicas (swell) que ingresan al Golfo Nuevo son sometidas a fuertes procesos de disipación de energía y llegan a la zona del proyecto de El Golfito con escasa altura. Por el contrario, el resultado de la modelación mostró que las olas generadas por vientos locales adquieren gran relevancia, pudiendo alcanzar alturas significativas superiores a los 2.0 m en las adyacencias de la zona donde se prevé la construcción de la Marina.

El análisis de un amplio número de escenarios, constituidos por la combinación de distintos valores de nivel del mar e intensidad y dirección del viento, contribuyó a la descripción de condiciones frecuentes y condiciones extremas para la propagación del oleaje generado por vientos locales. Del conjunto de escenarios analizados mediante la aplicación de **SWAN** se seleccionaron distintos valores de altura, período y dirección de propagación de las olas utilizados luego para el análisis de la agitación portuaria. Por otra parte, se presentó una serie de valores puntuales que podrán ser utilizados posteriormente como información de base para el análisis de la estabilidad de las obras de abrigo en un modelo físico.

Para el estudio de la agitación portuaria se aplicó el modelo **DIFRAC**, se evaluaron tres configuraciones de puerto diferentes estudiando cambios en la geometría y en la orientación de las obras de abrigo.

La primera configuración portuaria analizada (**Configuración I**) mostró efectos de amplificación del oleaje dentro de la dársena del puerto. Esta situación pondría en riesgo la seguridad de las embarcaciones debido a que se ven superados los valores de altura de ola significativa considerados admisibles ($H_s > 0.40$ m) para la embarcación de diseño.

Como alternativa para evitar los efectos de amplificación se estudió la apertura de la boca de acceso al puerto, para lo cual se propuso el acortamiento del muro vertical de cajones premoldeados del proyecto original, definiendo de esta manera la denominada **Configuración Ib**. Con la inclusión de esta modificación para la planta portuaria se analizaron distintos escenarios correspondientes a condiciones frecuentes y condiciones extremas del oleaje, y en todos los casos se observó una importante reducción de la agitación dentro del recinto portuario. Dado que para ninguno de los escenarios simulados se superó el valor de $H_s = 0.20$ m en el interior del puerto se consideró que la **Configuración Ib** brinda adecuadas condiciones de seguridad a las embarcaciones.

Se evaluó un segundo proyecto para la configuración portuaria de la marina (**Configuración II**), el cual incluye modificaciones sustanciales en la geometría del puerto respecto del diseño original. El estudio de agitación para este caso consideró el análisis de los mismos escenarios simulados para la configuración anterior. Los resultados fueron muy similares a los obtenidos para la **Configuración Ib**, observándose que en ninguno de los casos analizados se superó el valor de $H_s = 0.20$ m en el interior del puerto.

La última de las alternativas de proyecto evaluadas en este informe (**Configuración III**) mantiene la forma y las dimensiones de la **Configuración II**, pero las obras de abrigo se invierten en forma especular sobre un eje perpendicular a la costa. De esta manera, la boca del puerto queda orientada hacia el Este en lugar del Norte, como ocurría en los dos casos anteriores. Repitiendo los ensayos se pudo comprobar que con esta orientación el ingreso de las olas al recinto portuario aumenta levemente. Si bien la **Configuración III** sigue garantizando la seguridad de la embarcaciones, ya que en todos los casos se observó $H_s < 0.40$ m, la comparación puntual respecto de los dos casos anteriores (**Configuración Ib y Configuración II**) señala que con la boca orientada hacia el Este los valores de H_s en la zona de amarre resultan, en general, superiores a los obtenidos con la orientación hacia el Norte.

Finalmente, la comparación entre los resultados obtenidos para el análisis de la agitación portuaria para las distintas configuraciones, señala que la orientación más conveniente para las obras de abrigo es la que presenta la boca de acceso al puerto hacia el Norte, ya que de esta manera se minimiza el ingreso del oleaje a la zona de amarre. Para las dos configuraciones estudiadas con dicha orientación (**Configuración Ib y Configuración II**) no se observaron diferencias sustanciales, se puede considerar que ambas satisfacen adecuadamente las condiciones de seguridad requeridas por el proyecto.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ¹ Computation of combined refraction-diffraction, J.C.W. Berkhoff, Proc. 13th. Conference on Coastal Engineering, Vancouver, 1972.
- ² Difracción –Refracción Combinadas en Ondas de Agua. C. Vionnet. LHA 064-02-87.
- ³ 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)
- ⁴ Random Waves and Spectra , Yoshimi Goda, Handbook of Coastal and Ocean Engineering. Ch. 4. John B. Herbich, Editor, 1991.
- ⁵ Resonancia de puertos inducida por ondas gravitatorias, C. A. Vionnet. Informe INCyTH 064-05-88, (1988)
- ⁶ Estuary and Coastline Hydrodynamics. Ippen, A. T. Iowa Institute Hydraulic Research, 1966.

ANEXO I

GENERACION Y PROPAGACION DE OLAS

FIGURAS

ANEXO II

CONFIGURACIONES PORTUARIAS

ANEXO III

DIFRACCION DE OLAS

FIGURAS

ANEXO IV

EL MODELO DIFRAC

ANEXO V

COMPARACION CON OTRAS MODELACIONES

COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON OTROS ESTUDIOS

En este anexo se desarrolla una comparación entre valores de altura y período de olas presentados en este informe y los resultados equivalentes obtenidos en otros dos estudios independientes, realizados por **Taylor Engineering** y el Instituto de Hidrodinámica Aplicada (**INHA**) de Barcelona, respectivamente. Los valores que se comparan corresponden a la estimación de las olas incidentes en la zona de emplazamiento de las obras, por lo cual constituyen una información básica para los ensayos de la modelación física. Los escenarios que se analizan corresponden a situaciones extremas, con periodos de retorno (Tr) de 50 y 100 años.

Las **Tablas 1 a 3** presentan un resumen de la información contenida en cada uno de los informes mencionados, de los cuales se extrajeron los valores de H_s y T_p asociados a períodos de retorno de 50 y 100 años utilizados para comparar los resultados.

Tabla1. Resultados obtenidos por Taylor Engineering

Dirección del viento	Tr (años)	T_p (s)	H_s (m)
NE	50	6.3	1.52
NE	100	6.4	2.05

Tabla2 Resultados obtenidos por INHA (Barcelona)

Dirección del viento	Tr (años)	T_p (s)	H_s (m)
NNW	50	3.0	0.55
N	50	4.0	0.90
NNE	50	4.5	1.20
NE	50	6.5	1.60

Tabla3 Resultados obtenidos por INA – LHA

Dirección del viento	Tr (años)	T_p (s)	H_s (m)
N	50	5.2	1.75
NE	50	6.0	1.97
E	50	6.0	1.74
N	100	5.2	1.82
NE	100	6.0	2.05
E	100	6.0	1.87

Los resultados presentados en el informe de **Taylor Engineering (Tabla 1)** corresponden a un punto donde la profundidad es de 8.8 m en condiciones de pleamar. En dicho informe se analizaron condiciones de oleaje extremo solamente para la dirección NE, presentando como resultado los valores de H_s y T_p asociados a períodos de retorno de 50 y 100 años. Para la generación del oleaje por acción del viento se aplicó el modelo numérico STWAVE (Steady-

State Spectral Wave Model) y para modelar la propagación de las olas hasta la costa se utilizó el modelo REFDIF.

En el estudio realizado por INHA se aplicó el modelo de predicción del oleaje SPM (1984) basado en el espectro JONSWAP, en el cual los parámetros del espectro pueden ser determinados a partir de la velocidad del viento, U , del fetch, X , del período de pico del oleaje y del momento de orden cero m_0 . Para estudiar la propagación de las olas hacia la costa se utilizó el módulo PMS del modelo MIKE21. Los valores de H_s y T_p se encuentran asociados a $Tr=50$ años y son presentados en la **Tabla 2**. Estos resultados corresponden a un punto ubicado sobre el pie de la escollera de diseño.

La **Tabla 3** fue confeccionada con valores de cálculo presentados en la sección 6.2.2 de este informe. A fin de poder comparar los resultados de la modelación propia con los resultados obtenidos en los otros dos estudios, para la confección de la **Tabla 3**, se seleccionaron valores de H_s y T_p correspondientes a un punto ubicado sobre la traza de la escollera principal en el cual la profundidad es de 9.8 m para la condición de pleamar.

Surge de lo expuesto que hay un escenario en el que se dispone de resultados producidos por las tres fuentes (INA-LHA, TAYLOR, INHA) que es el correspondiente a viento de dirección NE para $Tr=50$ años. Dos escenarios más permiten la comparación entre dos de las fuentes (INHA / INA para la dirección y $Tr=50$ años) y TAYLOR / INA dirección NE $Tr=100$ años).

Cabe señalar que las tres fuentes han utilizado no solamente distintas metodologías de cálculo, sino también datos de base procesados de manera diferente, y los resultados han sido producidos para puntos de cálculo que, aunque representan una misma región, no son exactamente equivalentes.

Comparando los valores presentados en la **Tabla 1** con los de la **Tabla 3** puede observarse la coincidencia del resultado de la estimación a 100 años y una cierta diferencia en la estimación a 50 años. Esta diferencia se explica por la utilización de funciones de distribución de probabilidades diferentes para el análisis de valores extremos de vientos. En el informe de **Taylor Engineering** se aplicó una función de Gumbel, mientras que en la sección 5.2 de este informe se justificó la selección de una función de Weibull, con la cual se estimaron los valores de intensidad de viento asociados a distintas recurrencias para las direcciones de incidencia de interés para el estudio.

Cuando se comparan los valores de la **Tabla 2** con los valores correspondientes a recurrencias de 50 años presentados en las **Tabla 3** se observa que las diferencias son importantes, sobre todo en el caso de la dirección N.

En primer lugar, hay que señalar que la información de vientos utilizada como base del análisis fue distribuida arealmente de manera diferente. En el informe de INHA se analizaron las direcciones NNW, N, NNE y NE, mientras que en este informe el análisis estadístico se realizó sobre series de vientos que representaron a las direcciones N, NE y E; por lo tanto la información de base para la generación del oleaje no fue exactamente la misma.

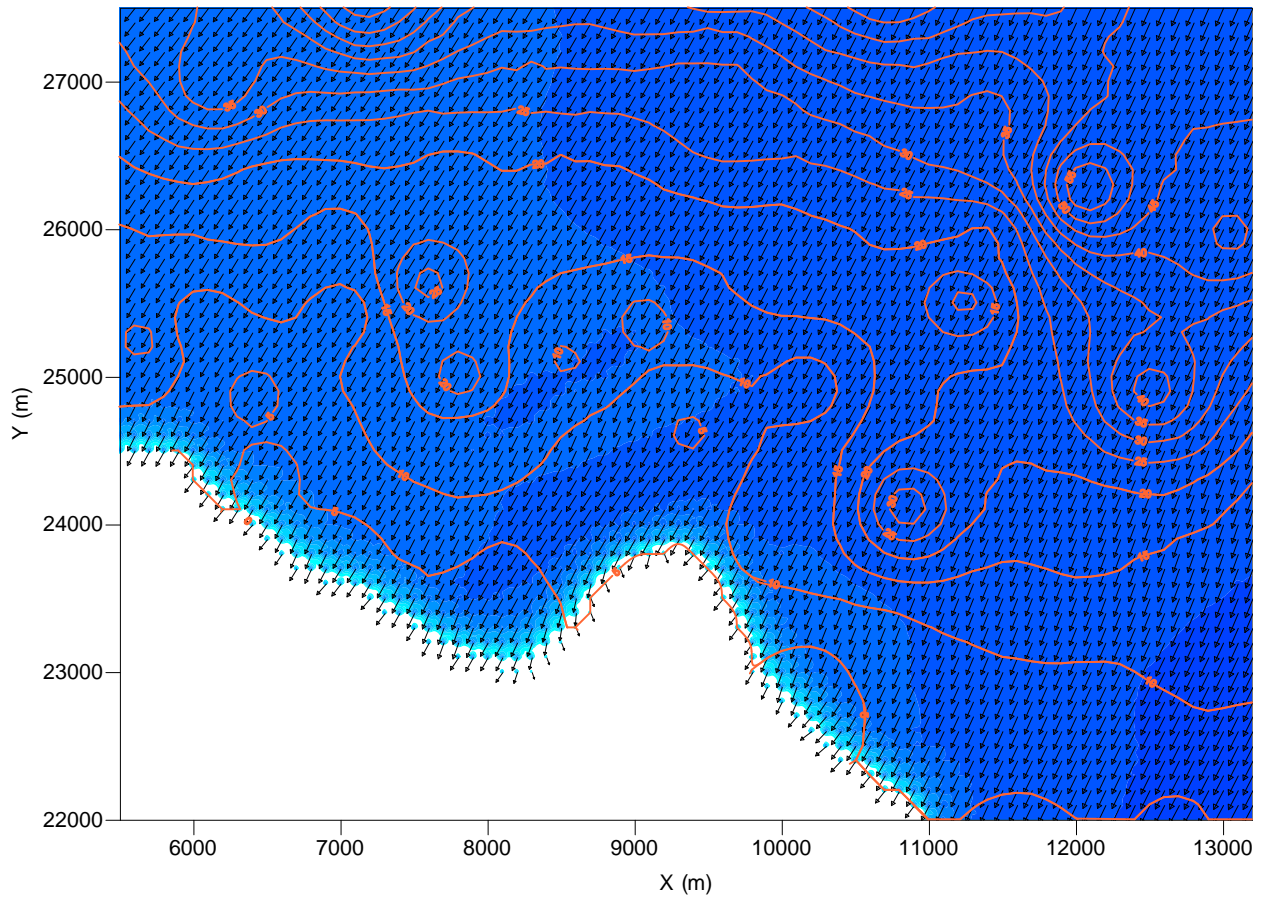
Por otro lado, la metodología utilizada en el estudio de INHA para la generación del oleaje implica la adopción de un valor de fetch constante (distancia de generación) asociado a cada dirección, sin considerar efectos de refracción y bajío. Es sabido que en las técnicas de cálculo de oleaje que utilizan esta metodología, la determinación del Fetch es una de los aspectos más complejos. La dirección Norte ofrece esta dificultad por la orientación de la costa opuesta, y los

resultados pueden ser sensibles a la metodología de cálculo. Es precisamente esta dirección la que muestra mayor diferencia de resultados.

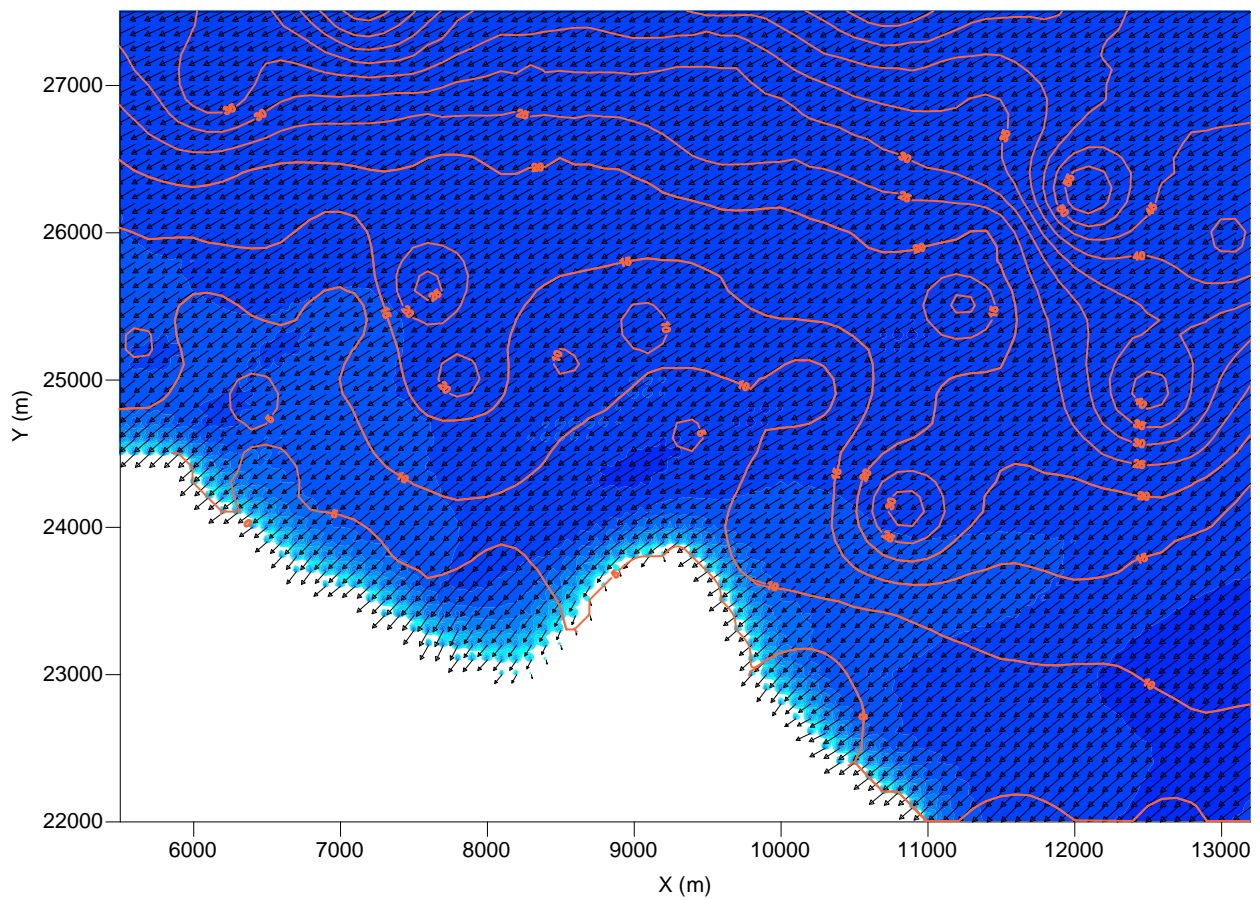
Los resultados de la aplicación de Swan para la generación y propagación del oleaje obtenidos en este estudio mostraron la importancia de los efectos de refracción y bajío en la zona del proyecto, lo cual explica también las diferencias entre los valores de Hs obtenidos en ambos estudios, sobre todo en el caso de la dirección N, ya que el NE al estar alineada perpendicularmente a la playa se encuentra afectada en menor medida por los efectos de la refracción.

Anexo I

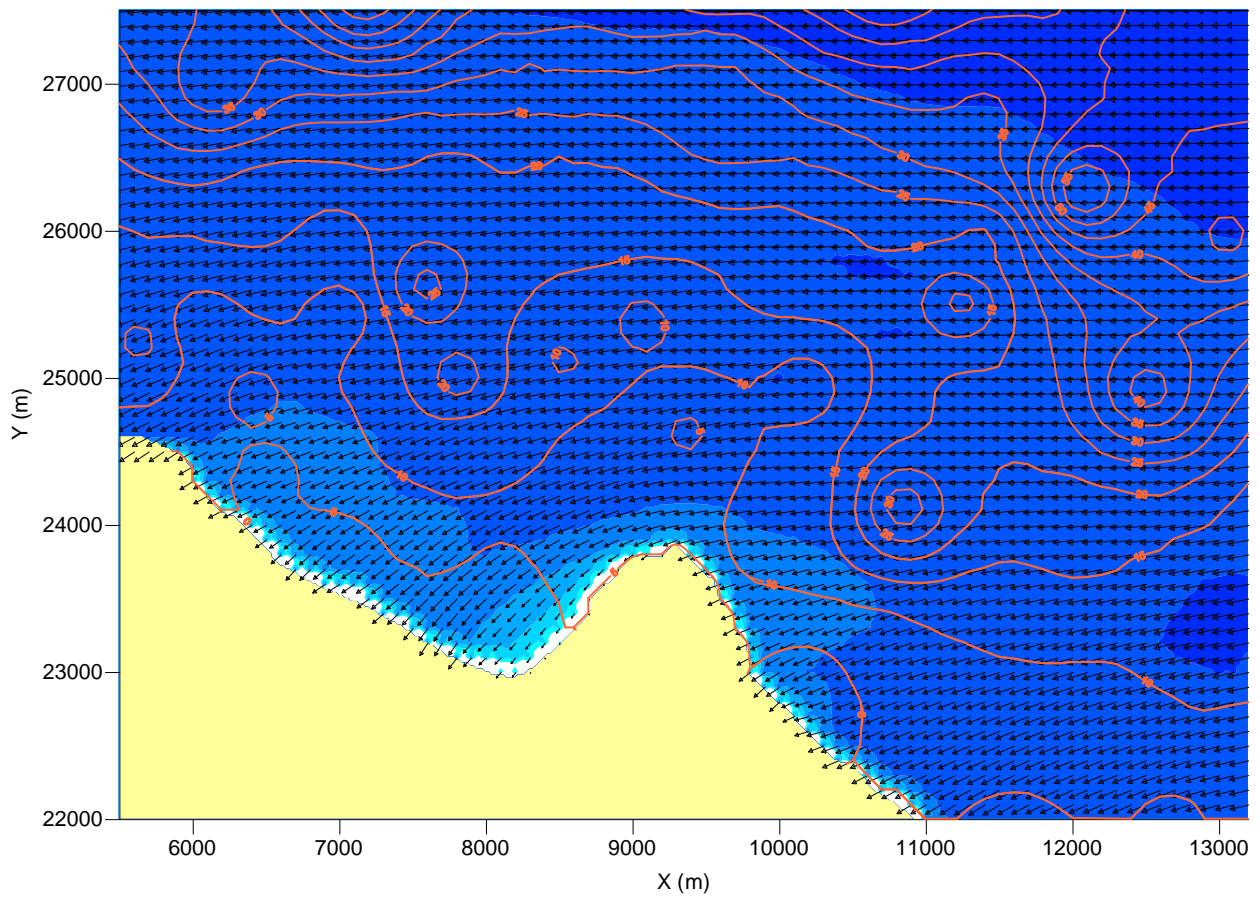
Resultado de la modelación de SWAN



**Figura I.1. Resultado de la modelación de SWAN
Escenario 4. Dirección Norte $N=3.0$ m $V=19.1$ m/s.**



**Figura I.2. Resultado de la modelación de SWAN
Escenario 11. Dirección Noreste $N=3.0$ m $V=16.6$ m/s.**



**Figura I.3. Resultado de la modelación de SWAN
Escenario 18. Dirección Este N=3.0 m V=16.0 m/s.**

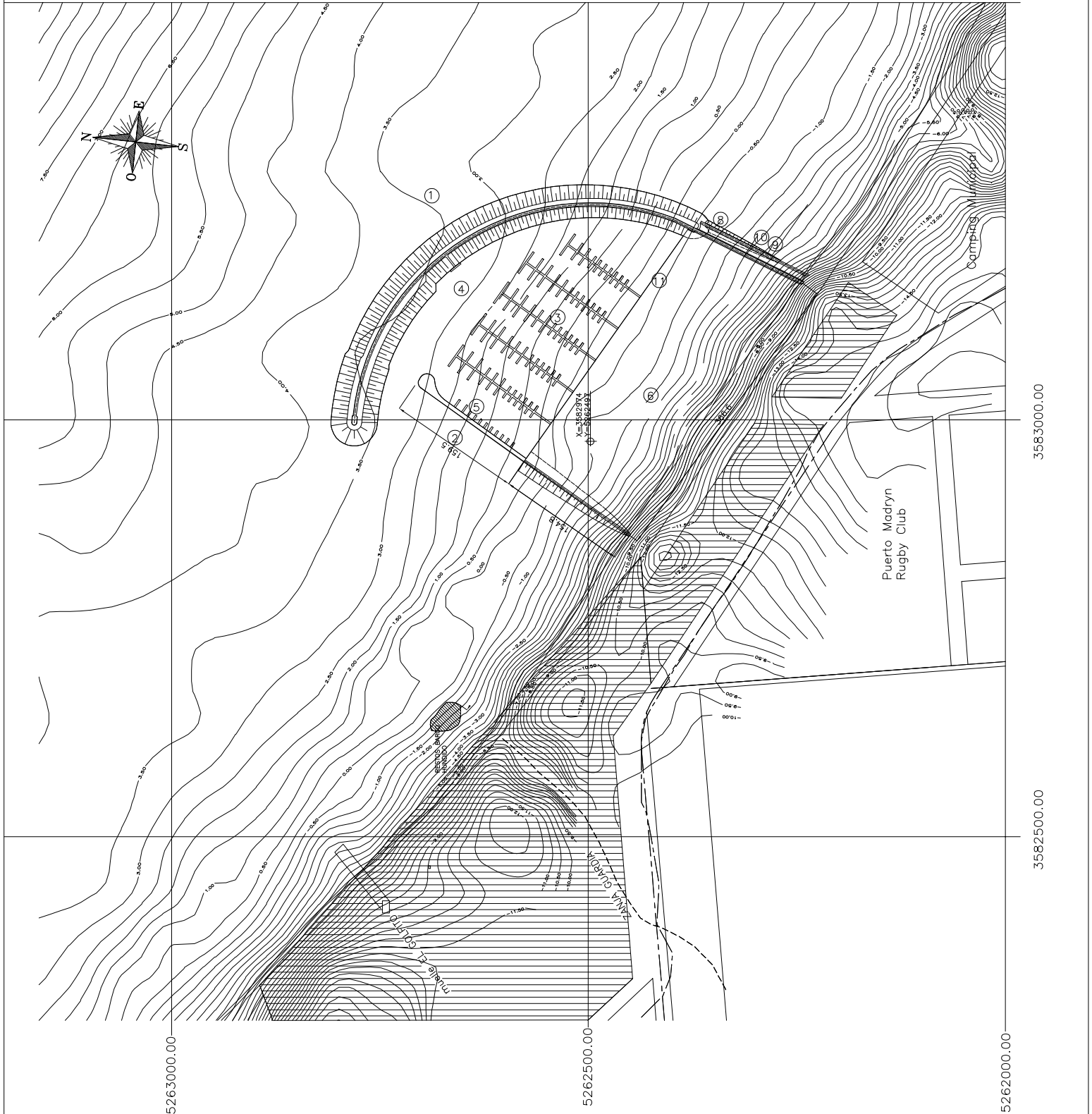
Anexo II

Configuraciones portuarias estudiadas

REFERENCIAS:

- ① ESCOLLERA PRINCIPAL (530 ml)
- ② MURO DE TABLESTACAS
- ③ MUELLES FLOTANTES (232 amarras)
- ④ POSTA DE INFLAMABLES CON ACCESO DESDE LA ESCOLLERA
- ⑤ ZONA PARA AMARRE DE EMBARCACIONES (22 amarras)
- ⑥ RECUPERACION DE 5,30Has.
- ⑦ PROTECCIÓN ÁREA EROSIONABLE
- ⑧ ENROCADO DE NIVELACION
- ⑨ GAVIONES
- ⑩ PROLONGACION VIADUCTO DE HORMIGON ARMADO
- ⑪ MURO FRONTAL DE TABLESTACAS

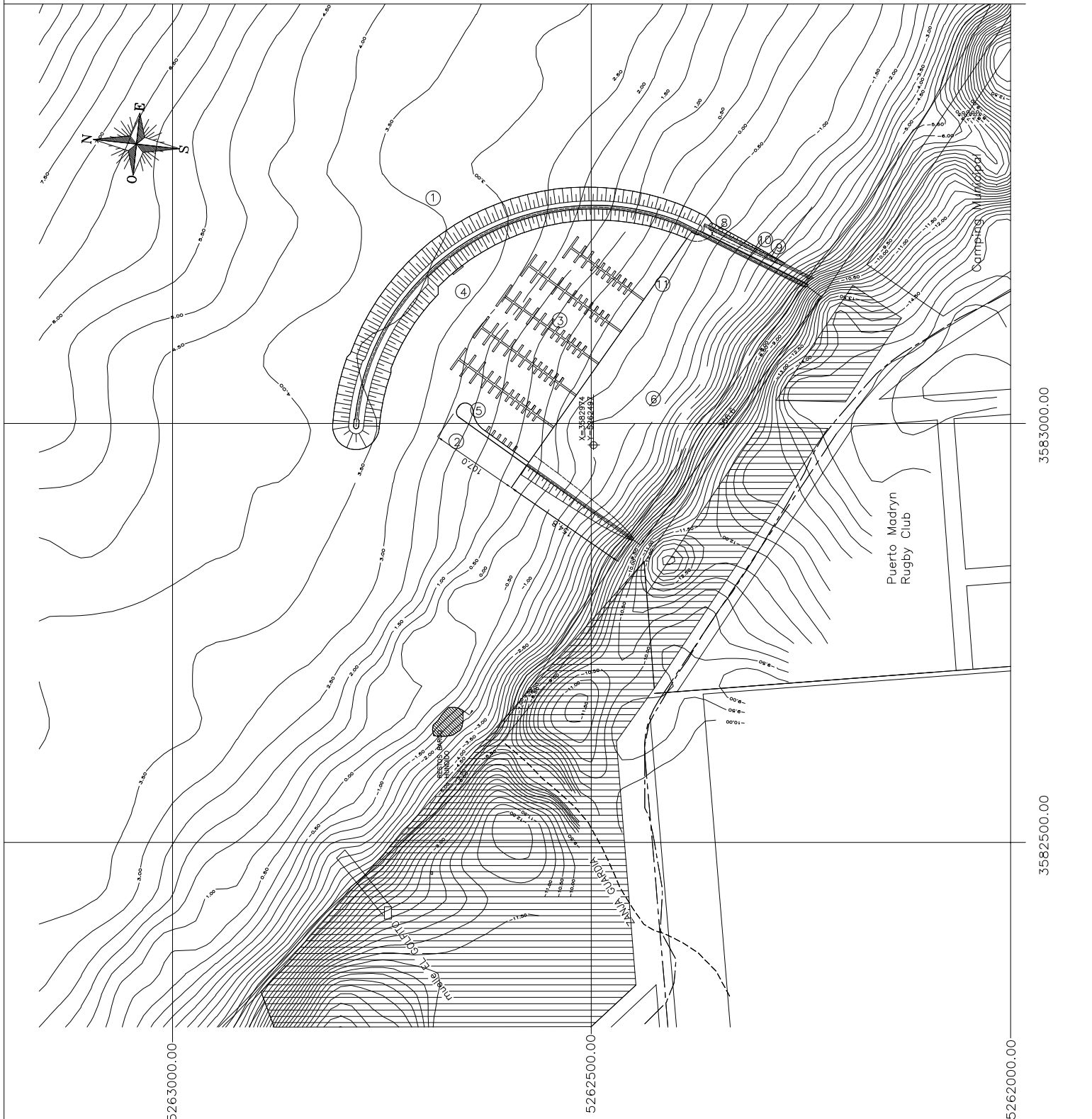
TOTAL DE AMARRAS: 254

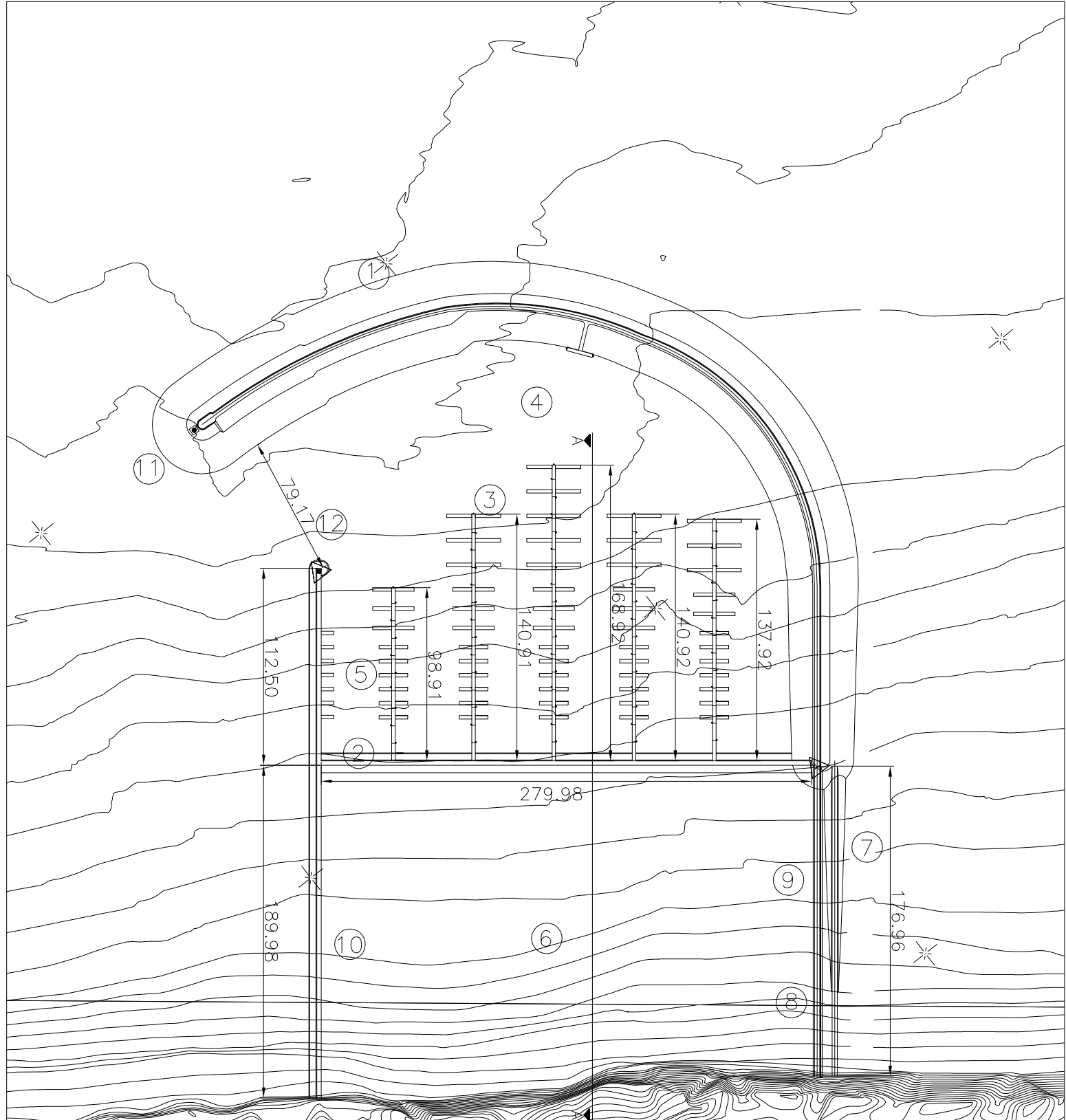


REFERENCIAS:

- ① ESCOLLERA PRINCIPAL (530 ml)
- ② MURO DE TABLESTACAS
- ③ MUELLES FLOTANTES (232 amarras)
- ④ POSTA DE INFLAMABLES CON ACCESO DESDE LA ESCOLLERA
- ⑤ ZONA PARA AMARRE DE EMBARCACIONES (22 amarras)
- ⑥ RECUPERACION DE 5,30Has.
- ⑦ PROTECCIÓN ÁREA EROSIONABLE
- ⑧ ENROCADO DE NIVELACION
- ⑨ GAVIONES
- ⑩ PROLONGACION VIADUCTO DE HORMIGON ARMADO
- ⑪ MURO FRONTAL DE TABLESTACAS

TOTAL DE AMARRAS: 254

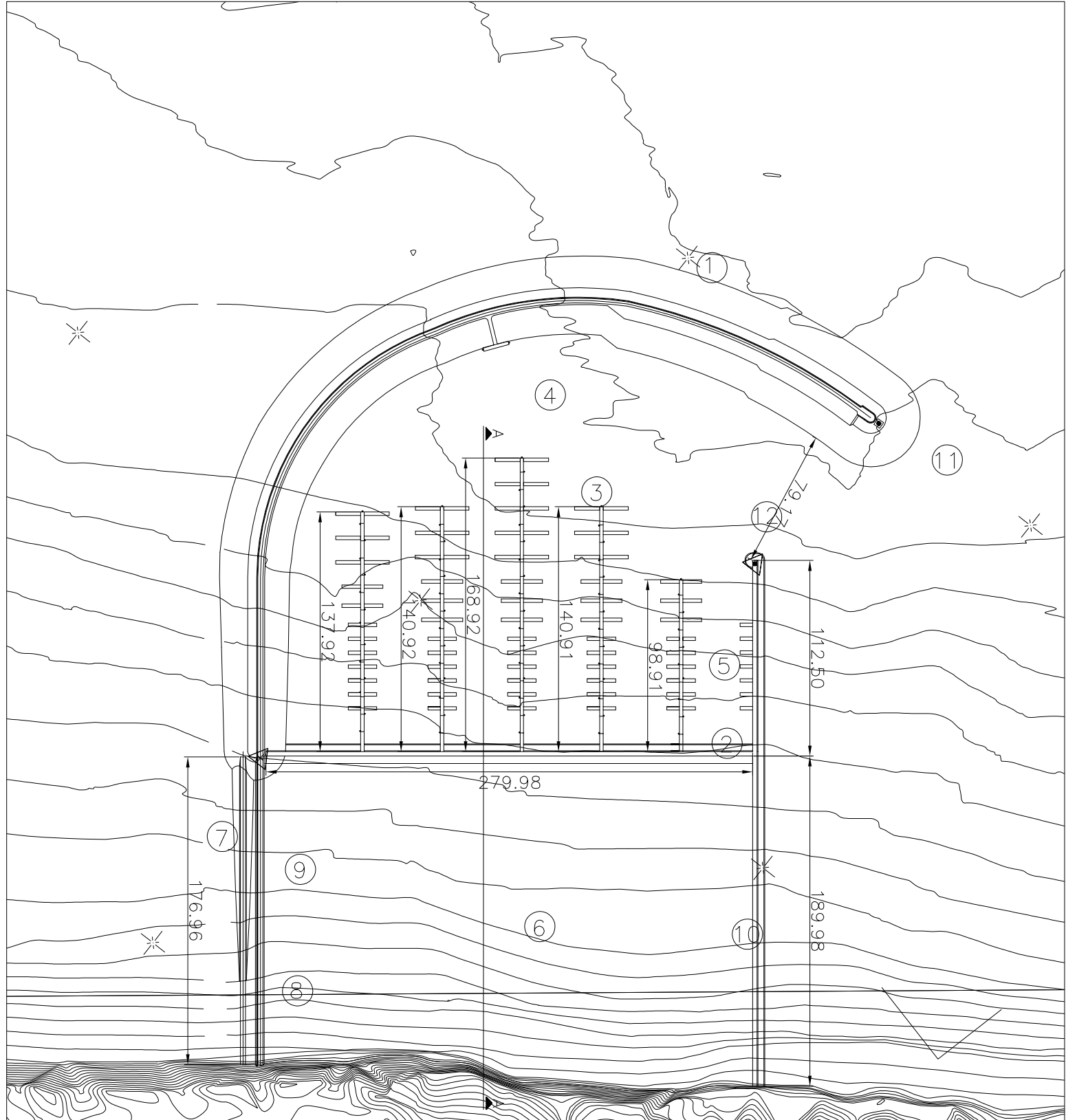




REFERENCIAS:

- ① ESCOLLERA PRINCIPAL (554.50 ml)
- ② CAJONES PREMOLDEADOS DE H°A°
- ③ MUELLES FLOTANTES (236 amarras)
- ④ POSTA DE INFLAMABLES CON ACCESO DESDE LA ESCOLLERA
- ⑤ ZONA PARA AMARRE DE EMBARCACIONES (14 amarras)
- ⑥ RECUPERACION DE 5,3 Has.
- ⑦ ENROCADO DE NIVELACION
- ⑧ GAVIONES
- ⑨ PROLONGACION VIADUCTO DE H° A°
- ⑩ CAJONES PREMOLDEADOS DE H°A°
- ⑪ ENROCADO DE CIERRE
- ⑫ BALIZAS

TOTAL DE AMARRAS: 250



REFERENCIAS:

- ① ESCOLLERA PRINCIPAL (554.50 ml)
- ② CAJONES PREMOLDEADOS DE H°A°
- ③ MUELLES FLOTANTES (236 amarras)
- ④ POSTA DE INFLAMABLES CON ACCESO DESDE LA ESCOLLERA
- ⑤ ZONA PARA AMARRE DE EMBARCACIONES (14 amarras)
- ⑥ RECUPERACION DE 5,3 Has.
- ⑦ ENROCADO DE NIVELACION
- ⑧ GAVIONES
- ⑨ PROLONGACION VIADUCTO DE HORMIGON ARMADO
- ⑩ CAJONES PREMOLDEADOS DE H°A°
- ⑪ ENROCADO DE CIERRE
- ⑫ BALIZAS

TOTAL DE AMARRAS: 250

Anexo III

Resultado de la modelación de DIFRAC

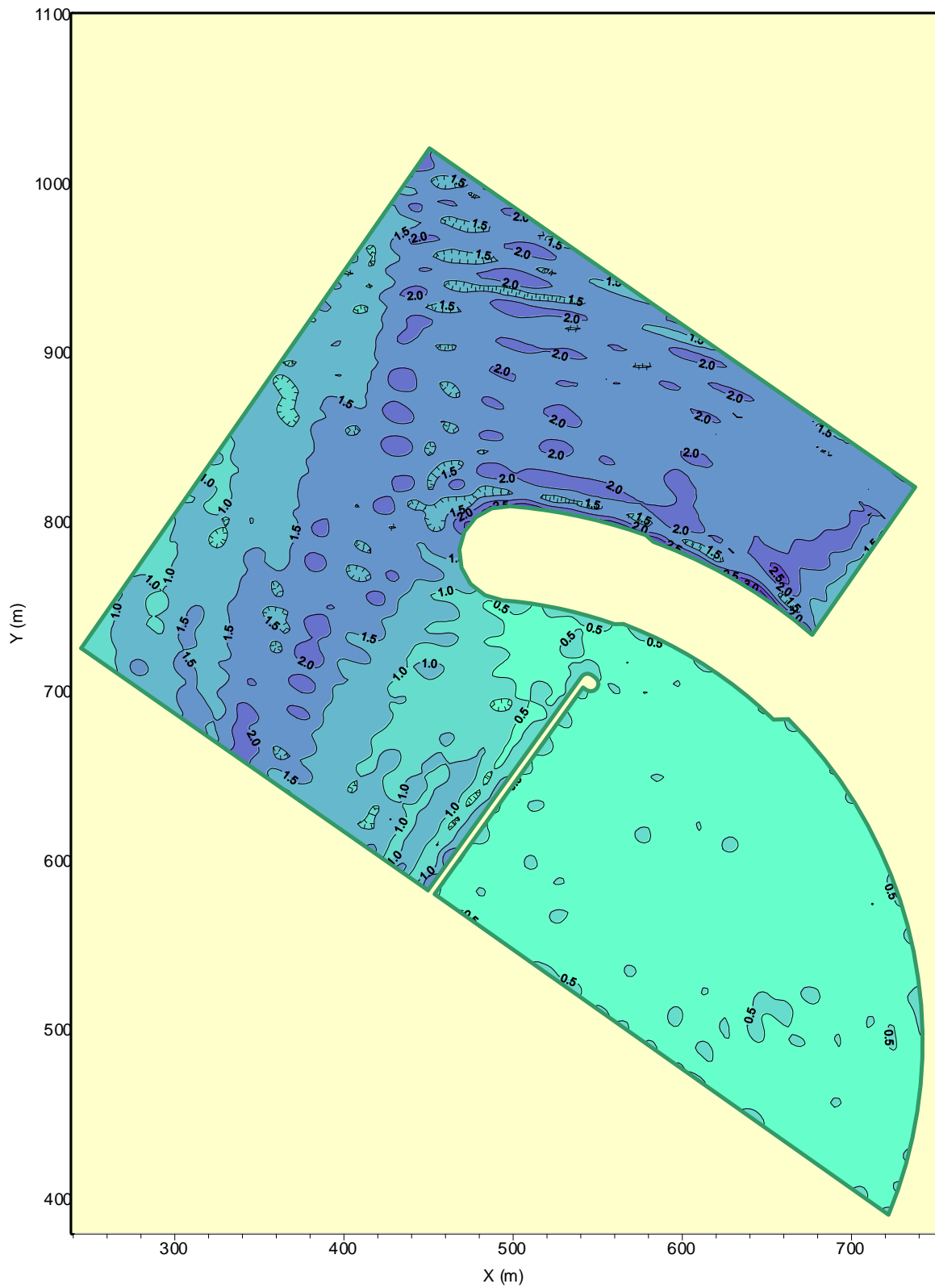


Figura I.1. Configuración I
Escenario 1: Dirección Norte N=3.00 m Hs=1.70 m Tp=5.2 s.

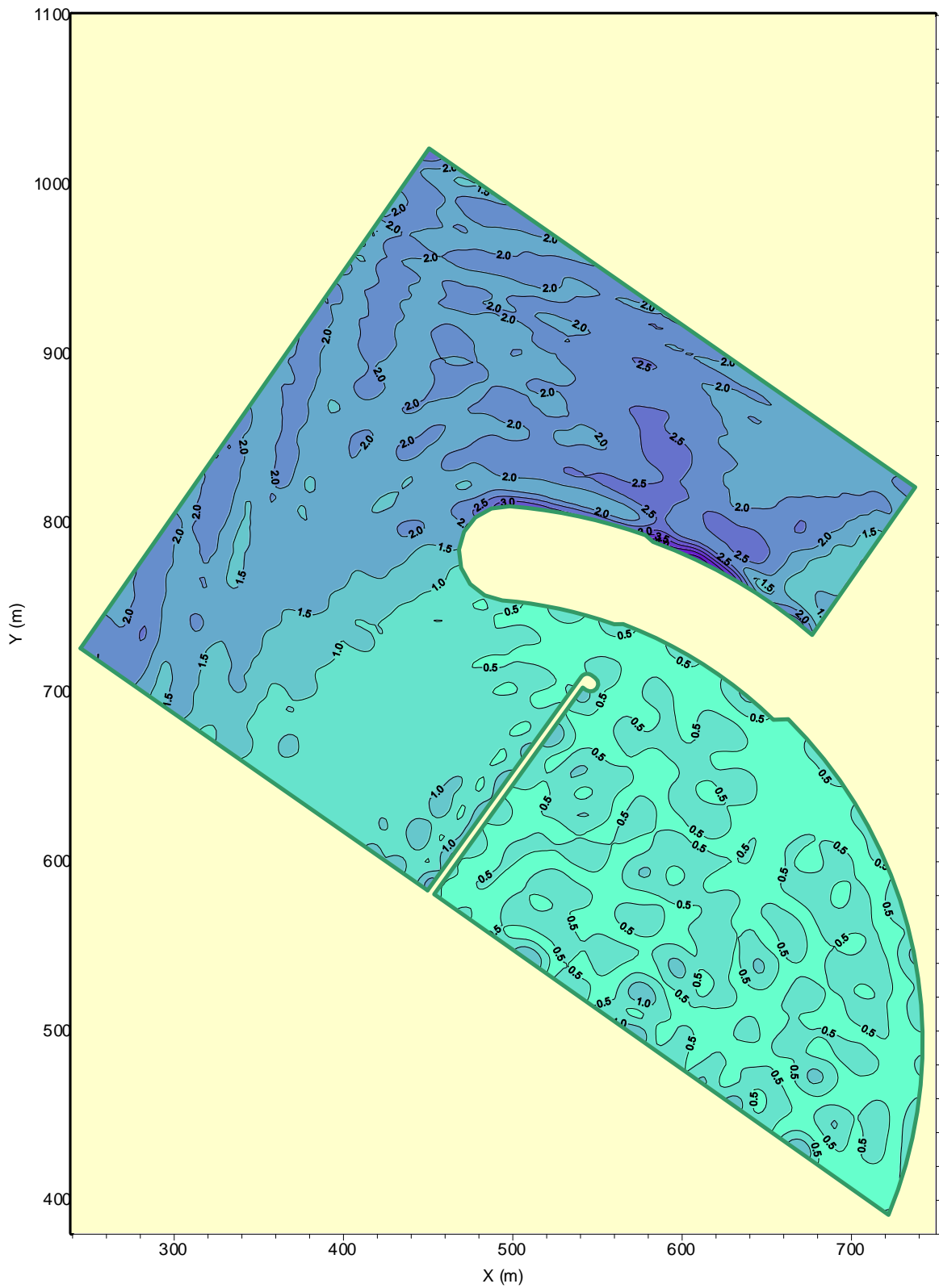


Figura I.2. Configuración I
Escenario 2: Dirección Noreste N=3.00 m Hs=1.98 m Tp=6.0 s.

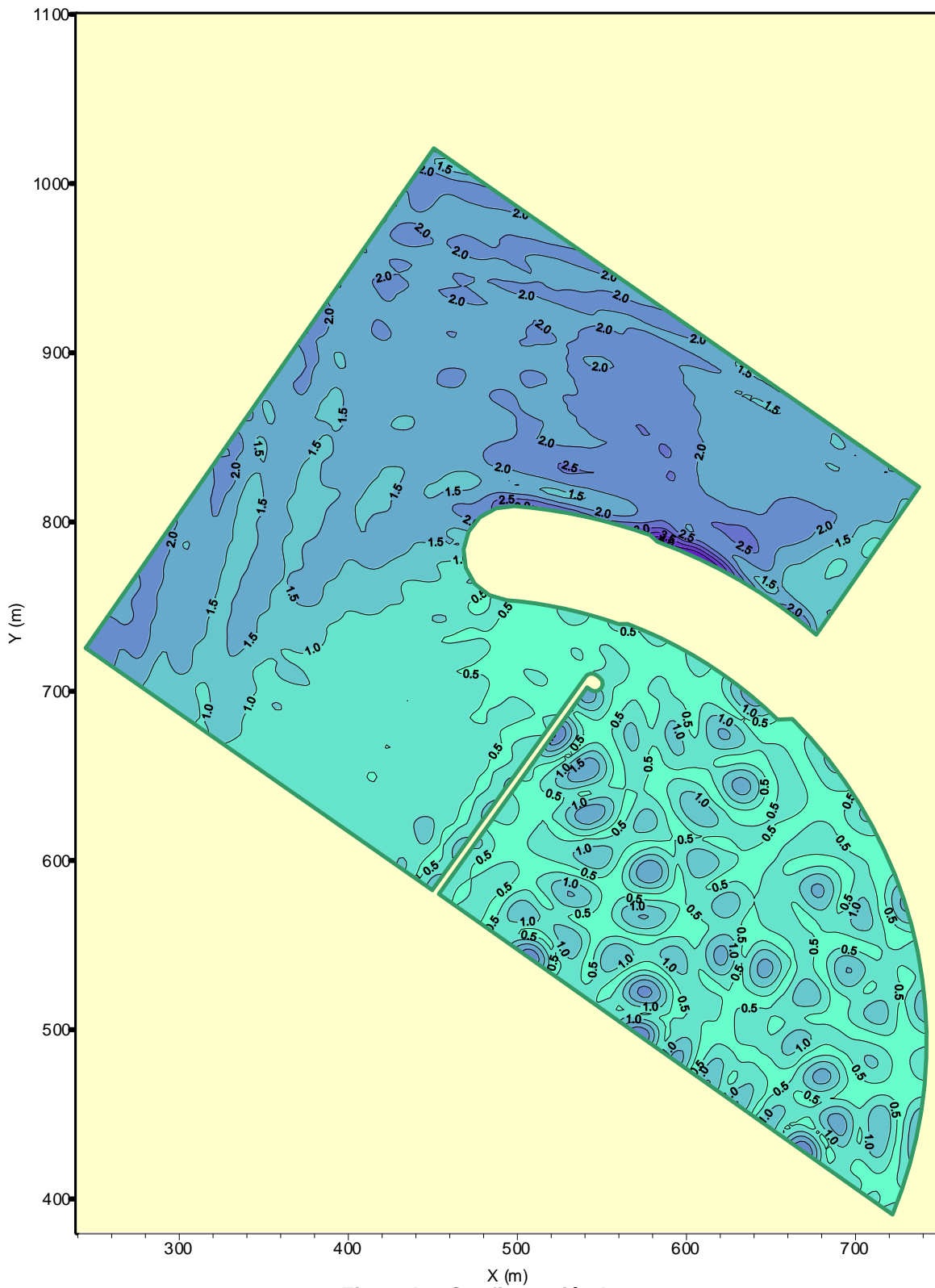


Figura I.3. Configuración I
Escenario 3: Dirección Este N=3.00 m Hs=1.85 m Tp=6.0 s.

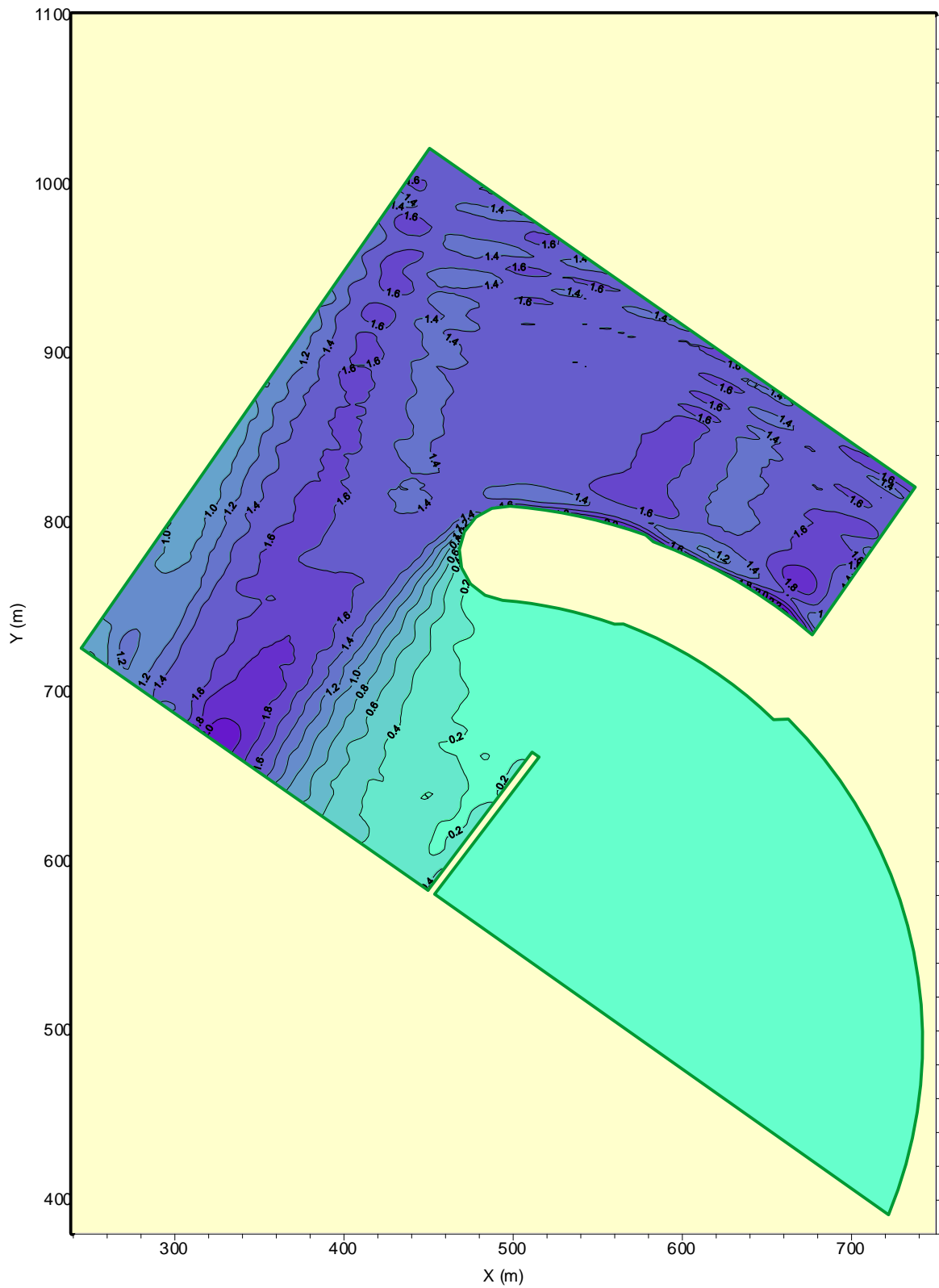


Figura Ib.1. Configuración Ib
Escenario 1: Dirección Norte N=6.52 m Hs=1.85 m Tp=5.2 s.

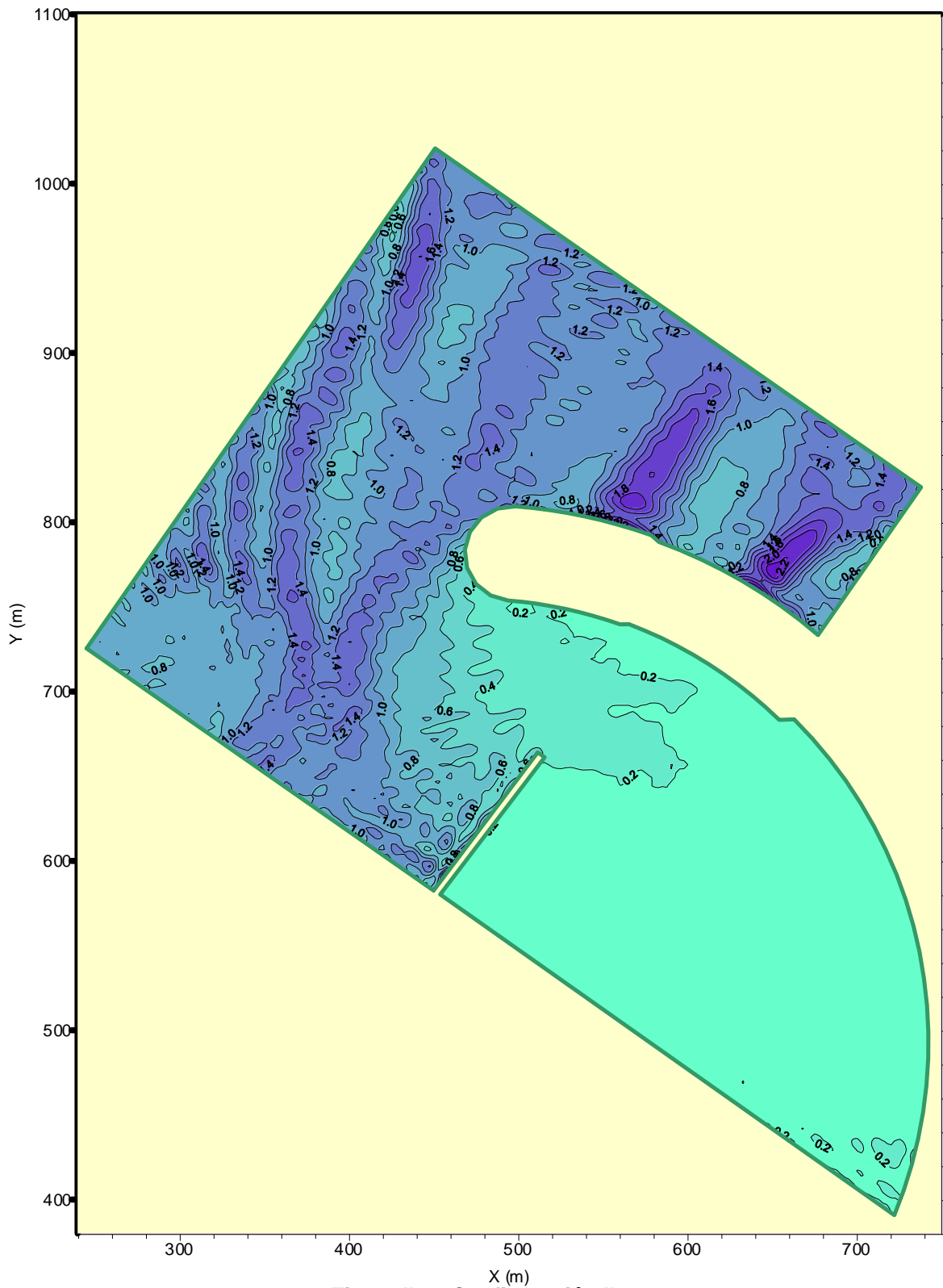


Figura Ib.2. Configuración Ib
Escenario 3: Dirección Norte N=0.00 m Hs=1.45 m Tp=5.2 s.

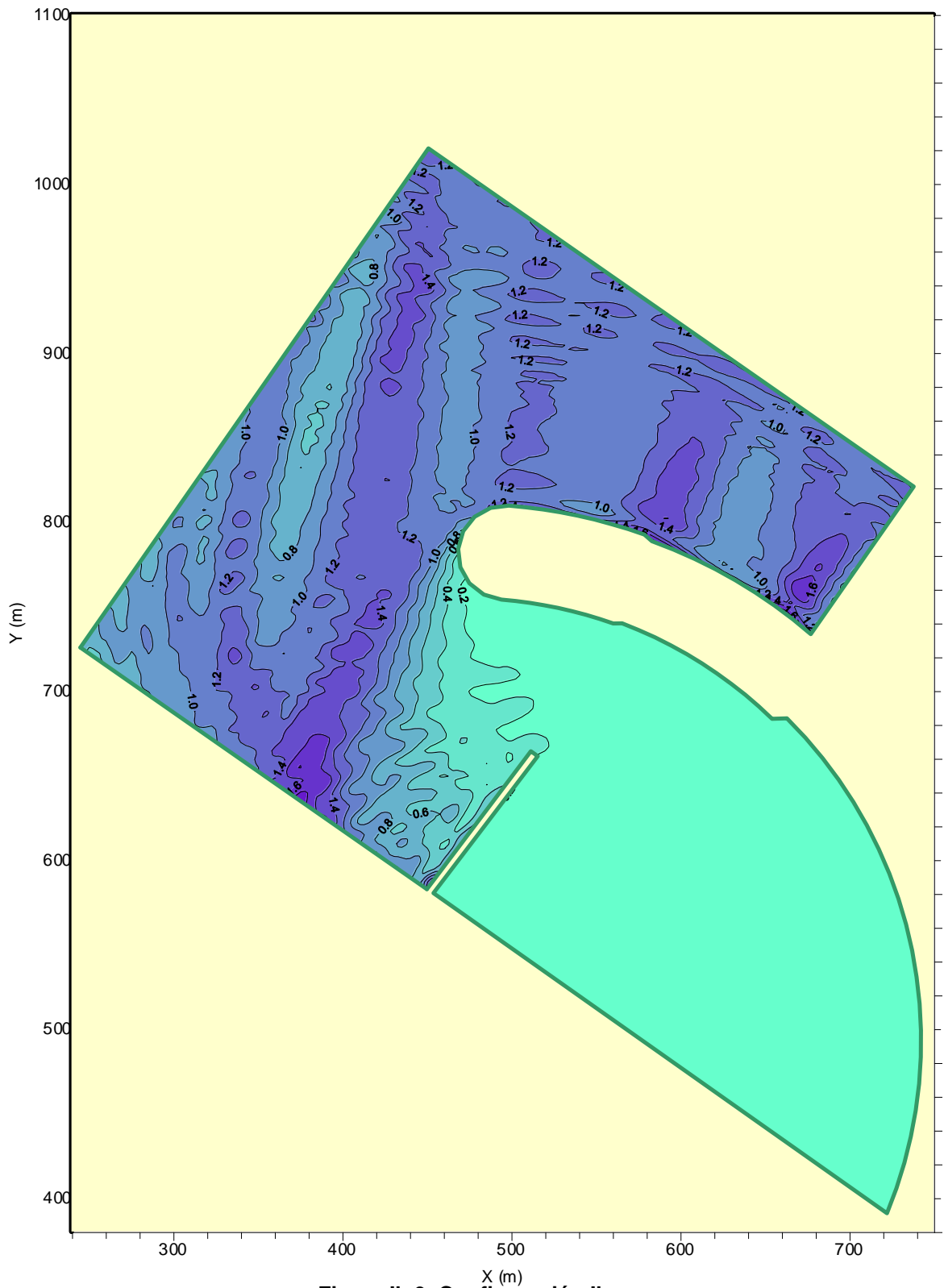


Figura Ib.3. Configuración Ib
Escenario 4: Dirección Norte N=3.00 m Hs=1.15 m Tp=4.5 s.

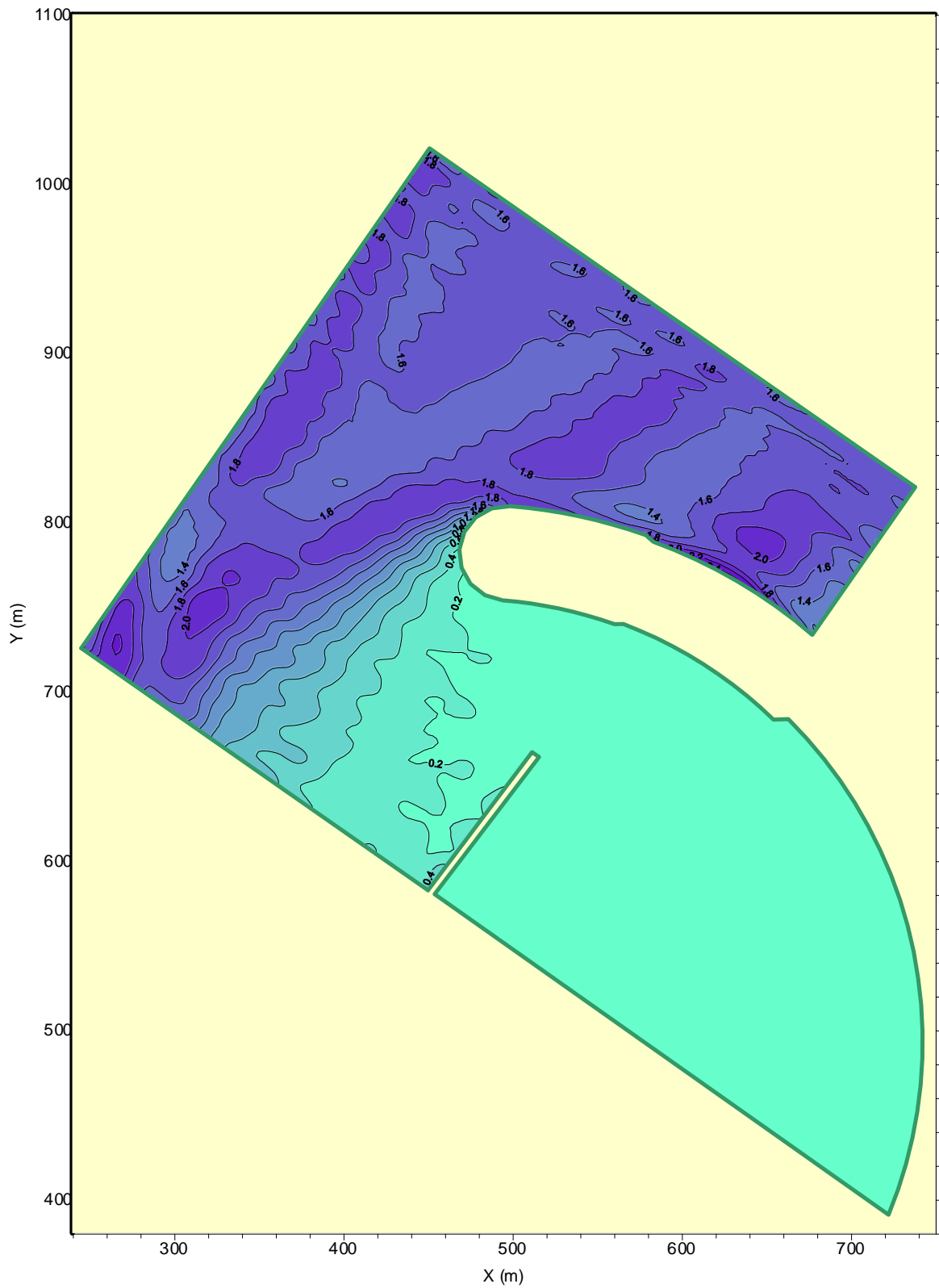


Figura Ib.4. Configuración Ib
Escenario 6: Dirección Noreste N=6.52 m Hs=2.08 m Tp=6.0 s.

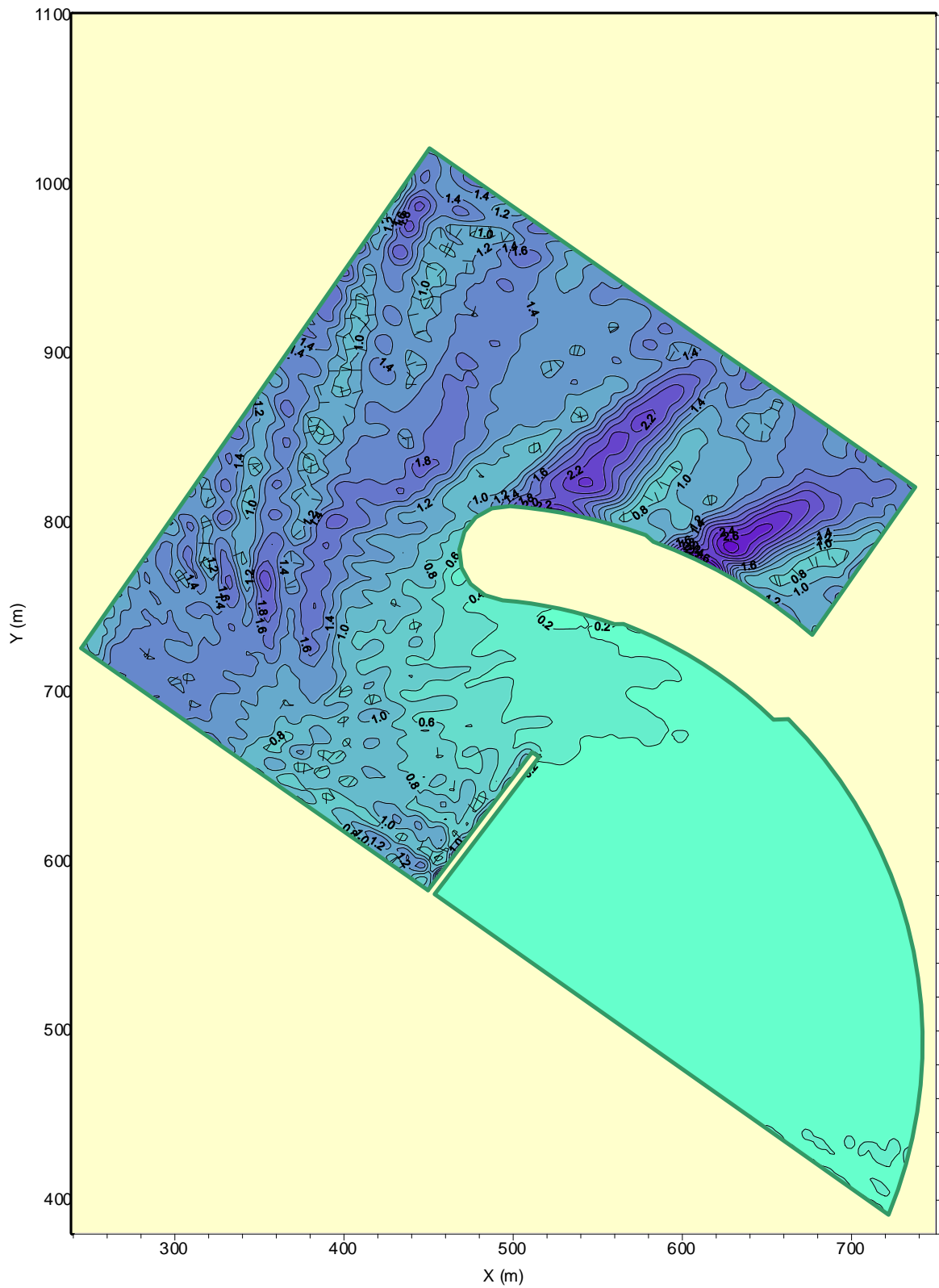


Figura Ib.5. Configuración Ib
Escenario 8: Dirección Noreste N=0.00 m Hs=1.70 m Tp=6.0 s.

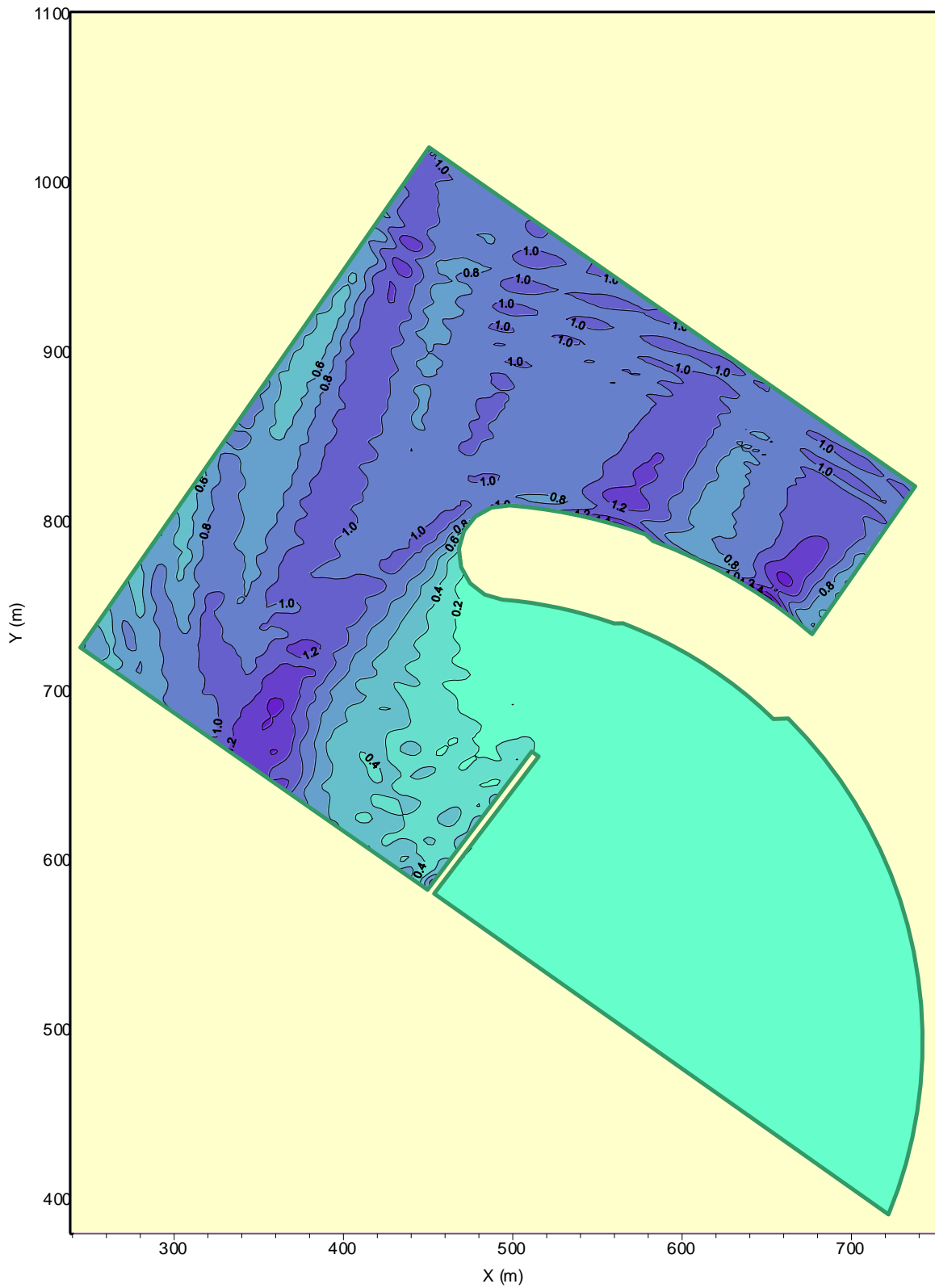


Figura Ib.6. Configuración Ib
Escenario 9: Dirección Noreste N=3.00 m Hs=0.95 m Tp=4.5 s.

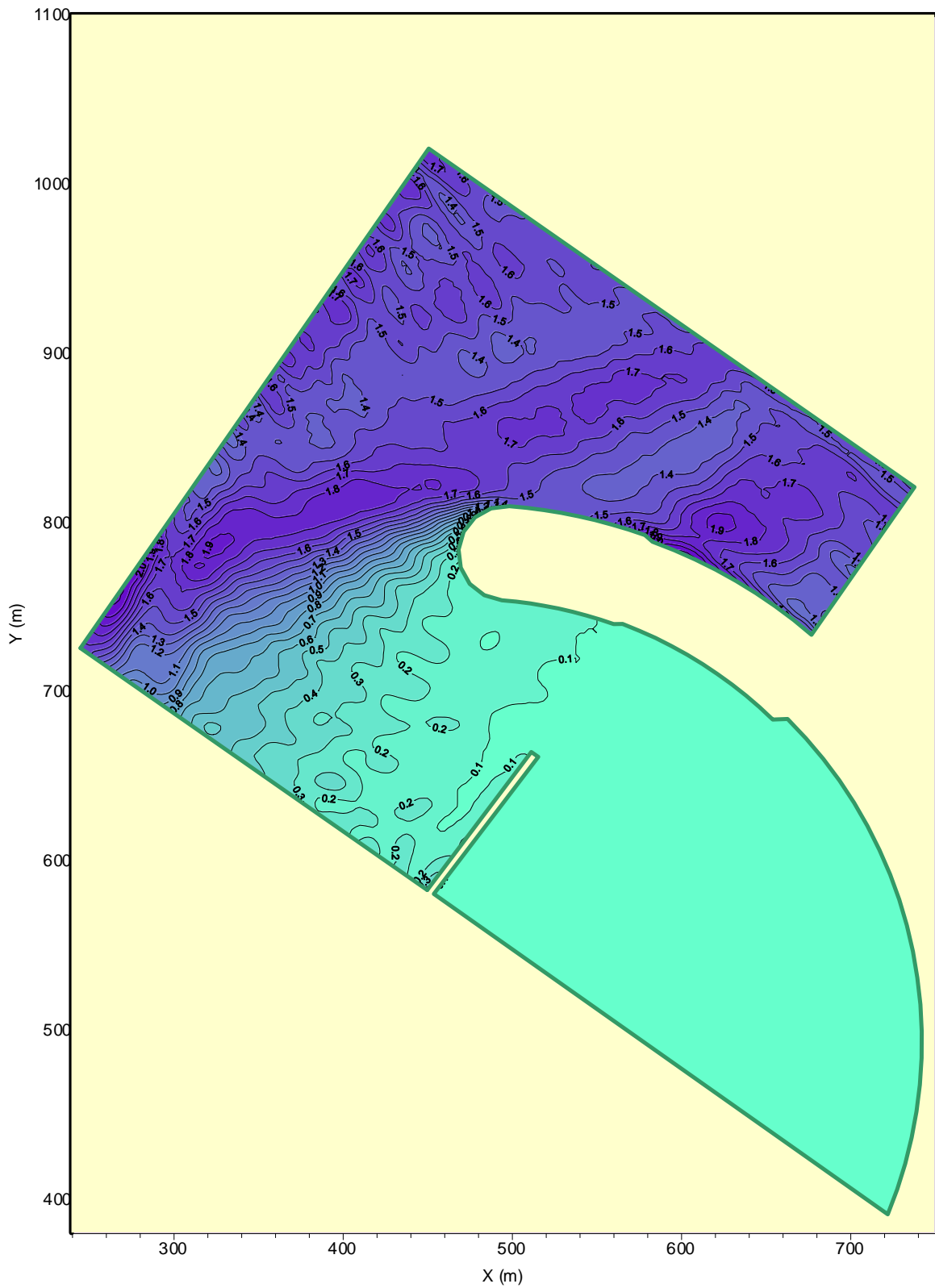


Figura Ib.7. Configuración Ib
Escenario 11: Dirección Este N=6.52 m Hs=1.95 m Tp=6.0 s.

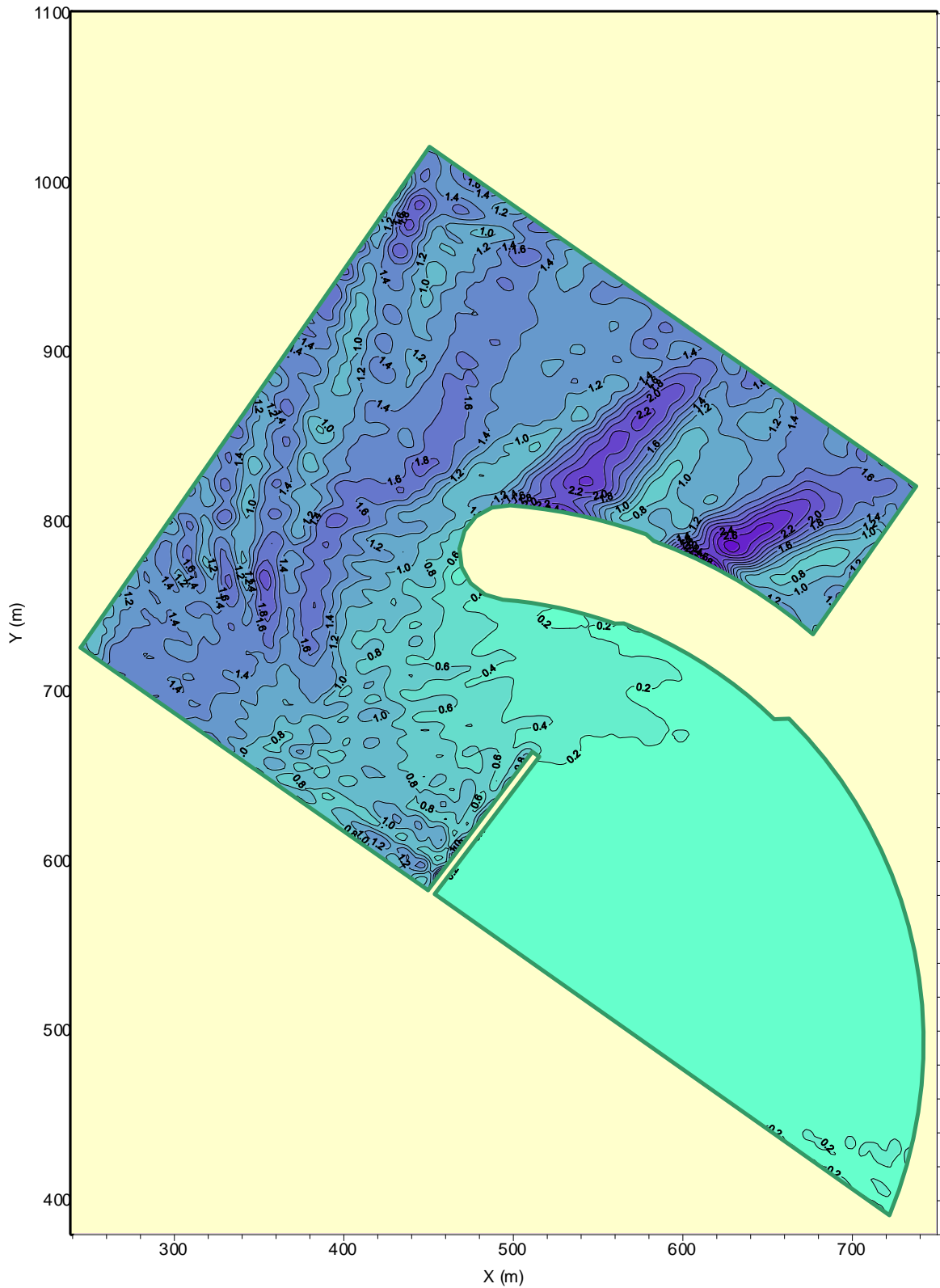


Figura Ib.8. Configuración Ib
Escenario 13: Dirección Este N=0.00 m Hs=1.70 m Tp=6.0 s.

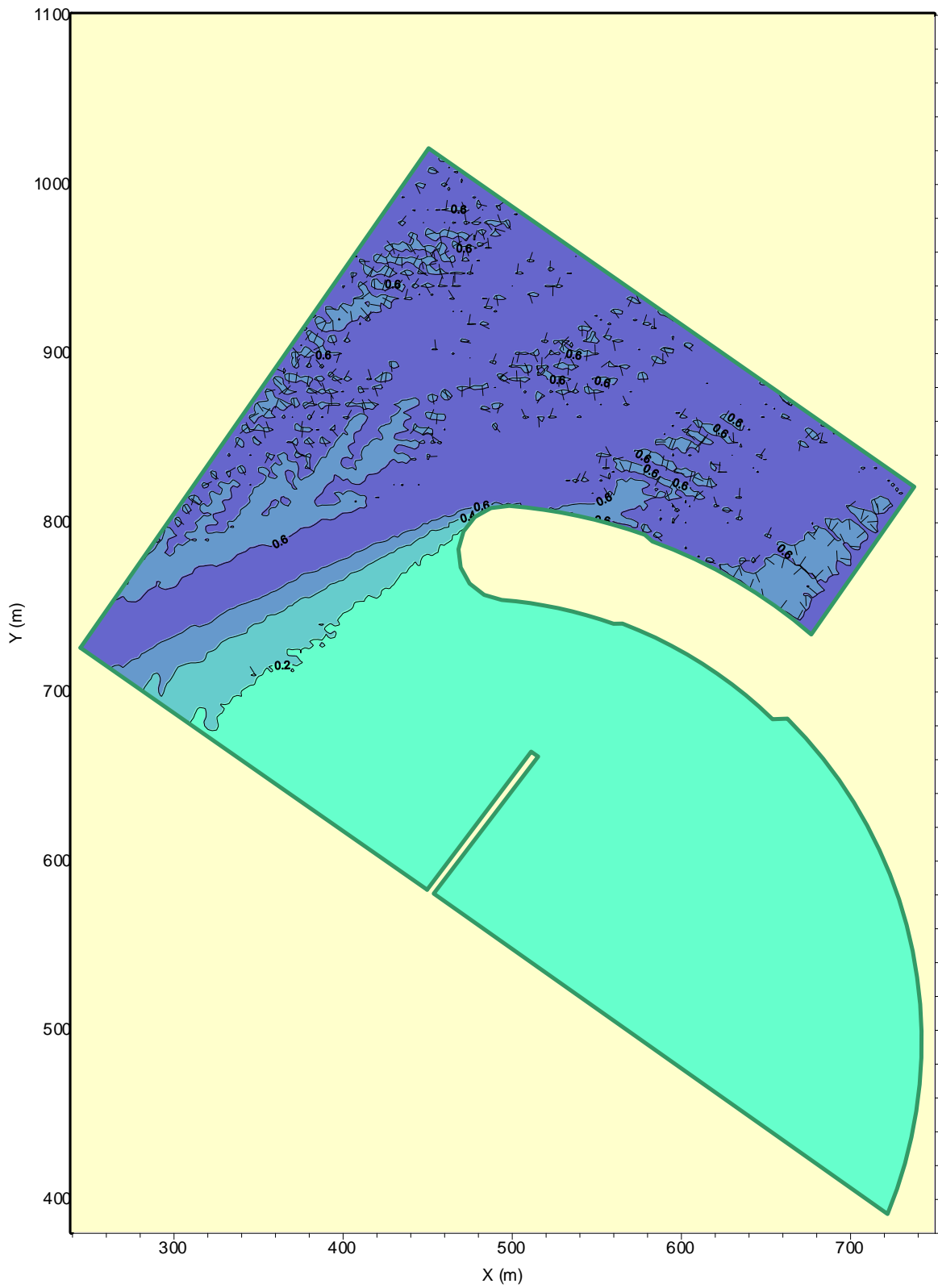


Figura Ib.9. Configuración Ib
Escenario 14: Dirección Este N=3.00 m Hs=0.65 m Tp=2.85 s.

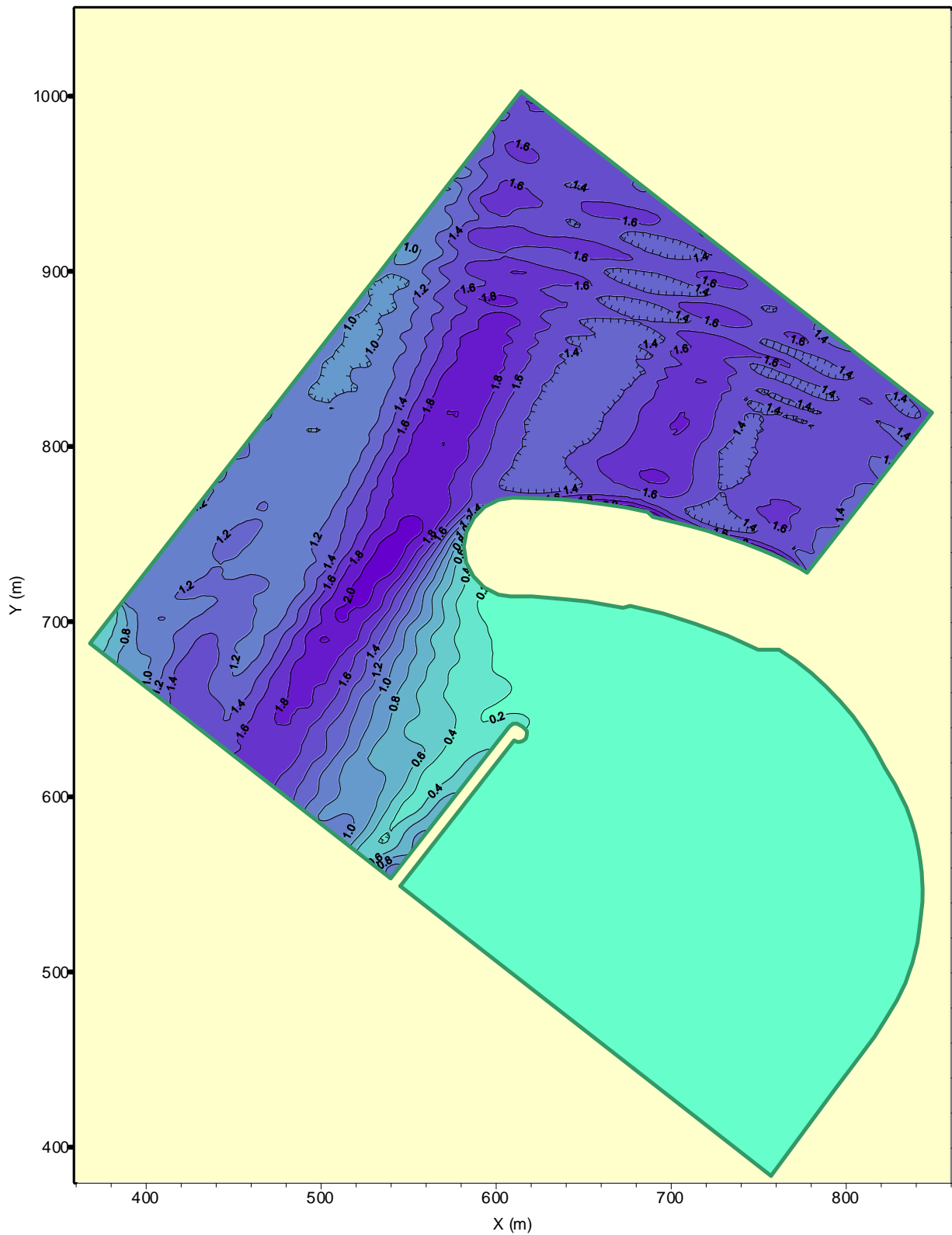


Figura II.1. Configuración II
Escenario 1: Dirección Norte N=6.52 m Hs=1.85 m Tp=5.2 s.

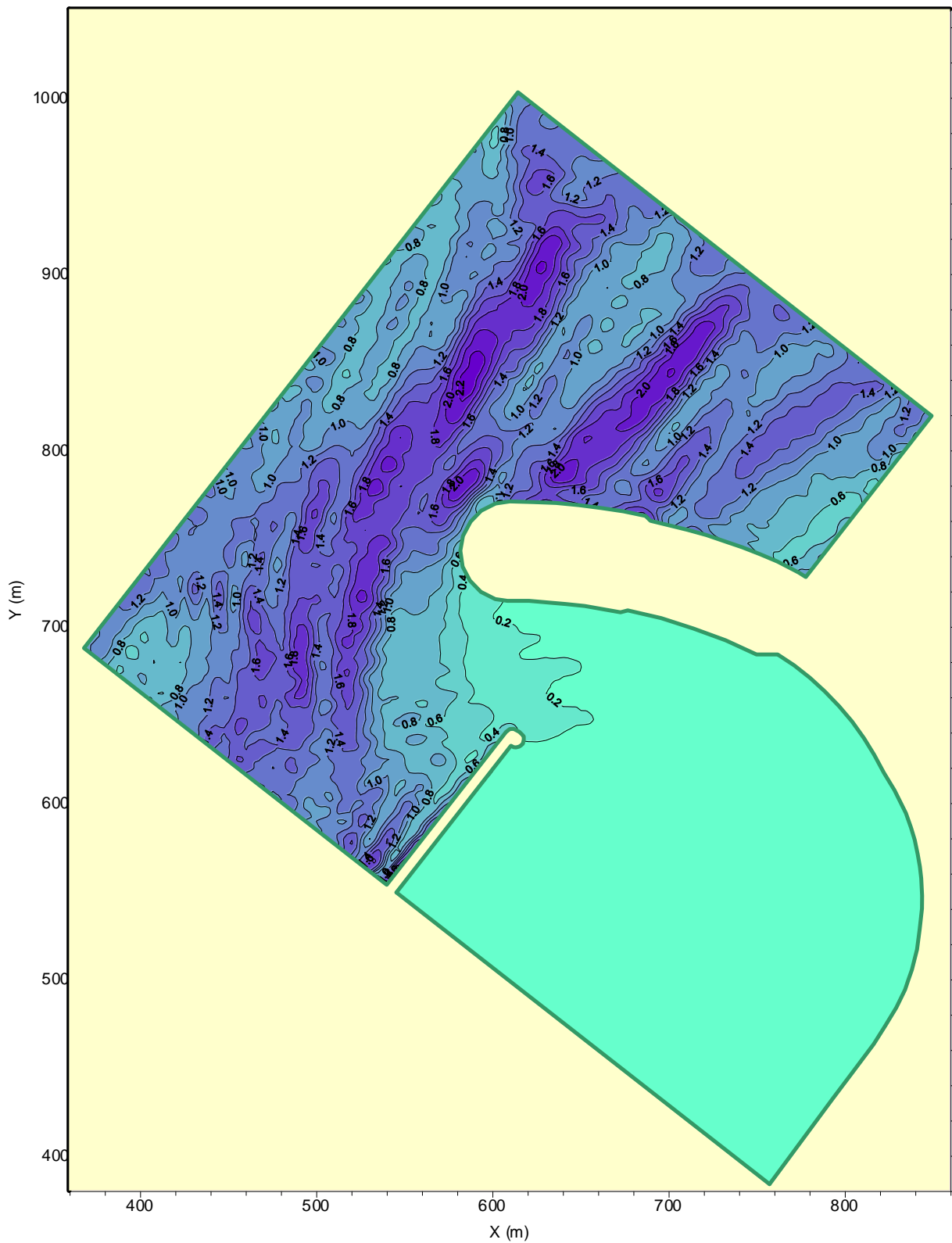


Figura II.2. Configuración II
Escenario 3: Dirección Norte $N=0.00$ m $H_s=1.45$ m $T_p=5.2$ s.

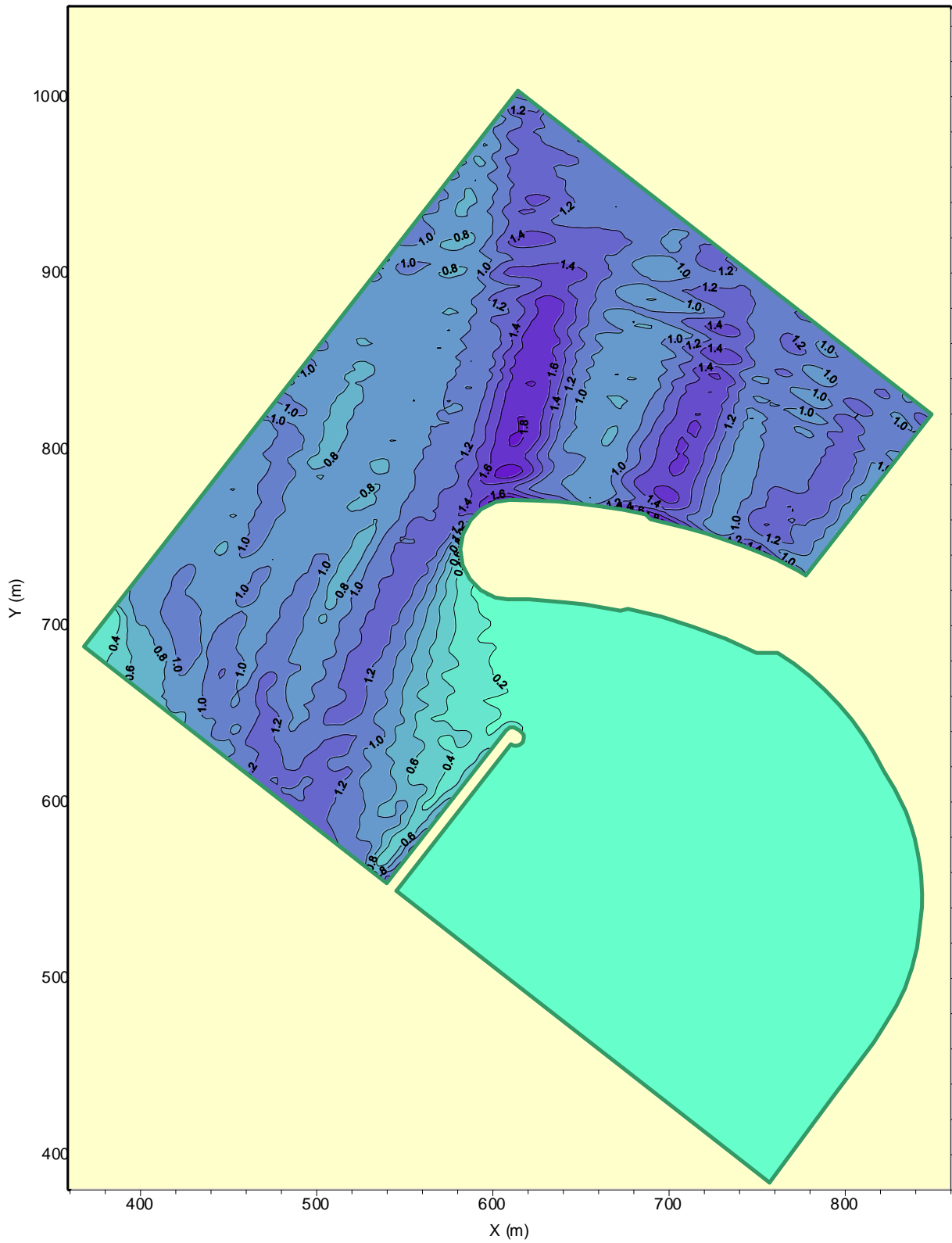


Figura II.3. Configuración II
Escenario 4: Dirección Norte N=3.00 m Hs=1.15 m Tp=4.5 s

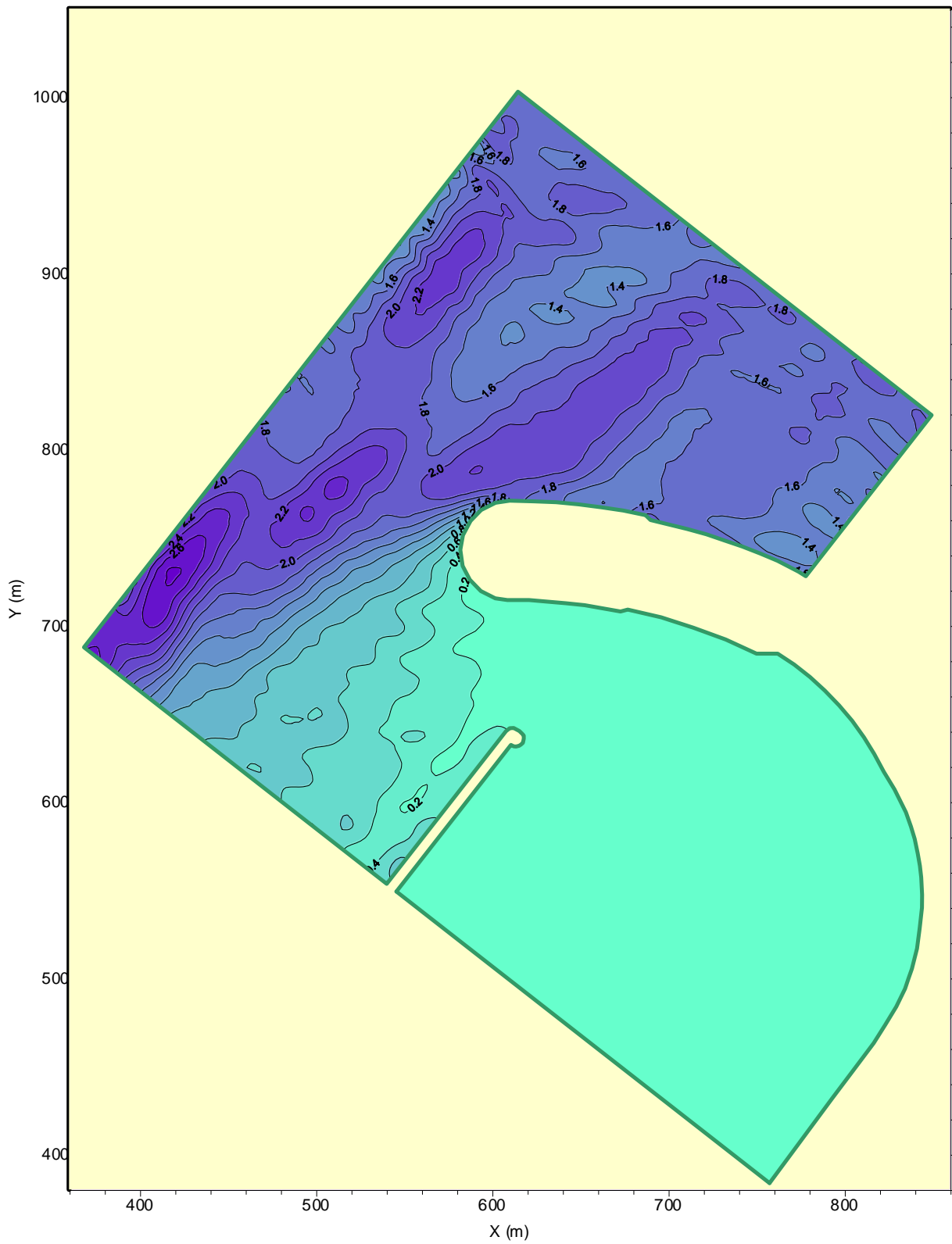


Figura II.4. Configuración II
Escenario 6: Dirección Noreste N=6.52 m Hs=2.08 m Tp=6.0 s

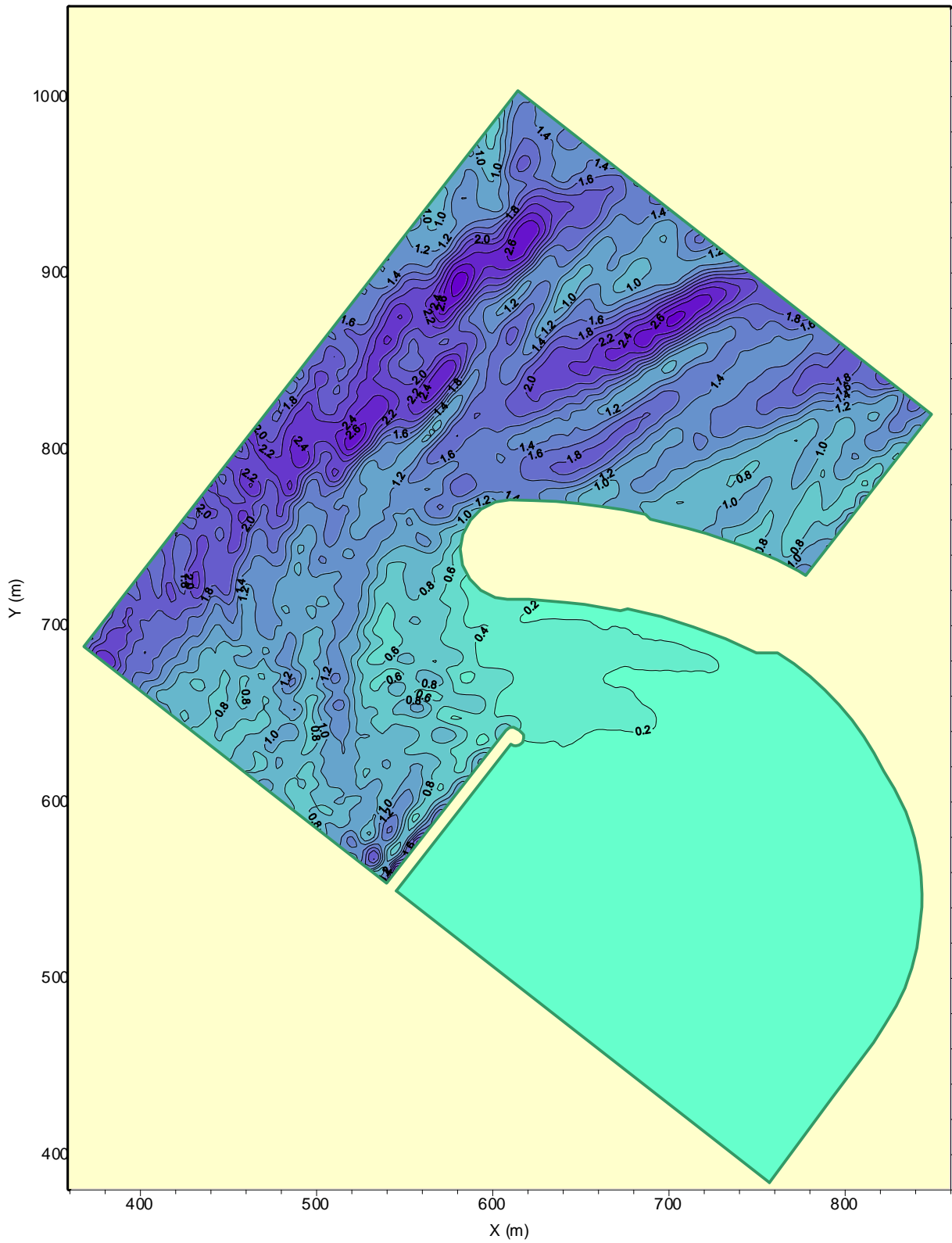


Figura II.5. Configuración II
Escenario 8: Dirección Noreste $N=0.00$ m $H_s=1.70$ m $T_p=6.0$ s

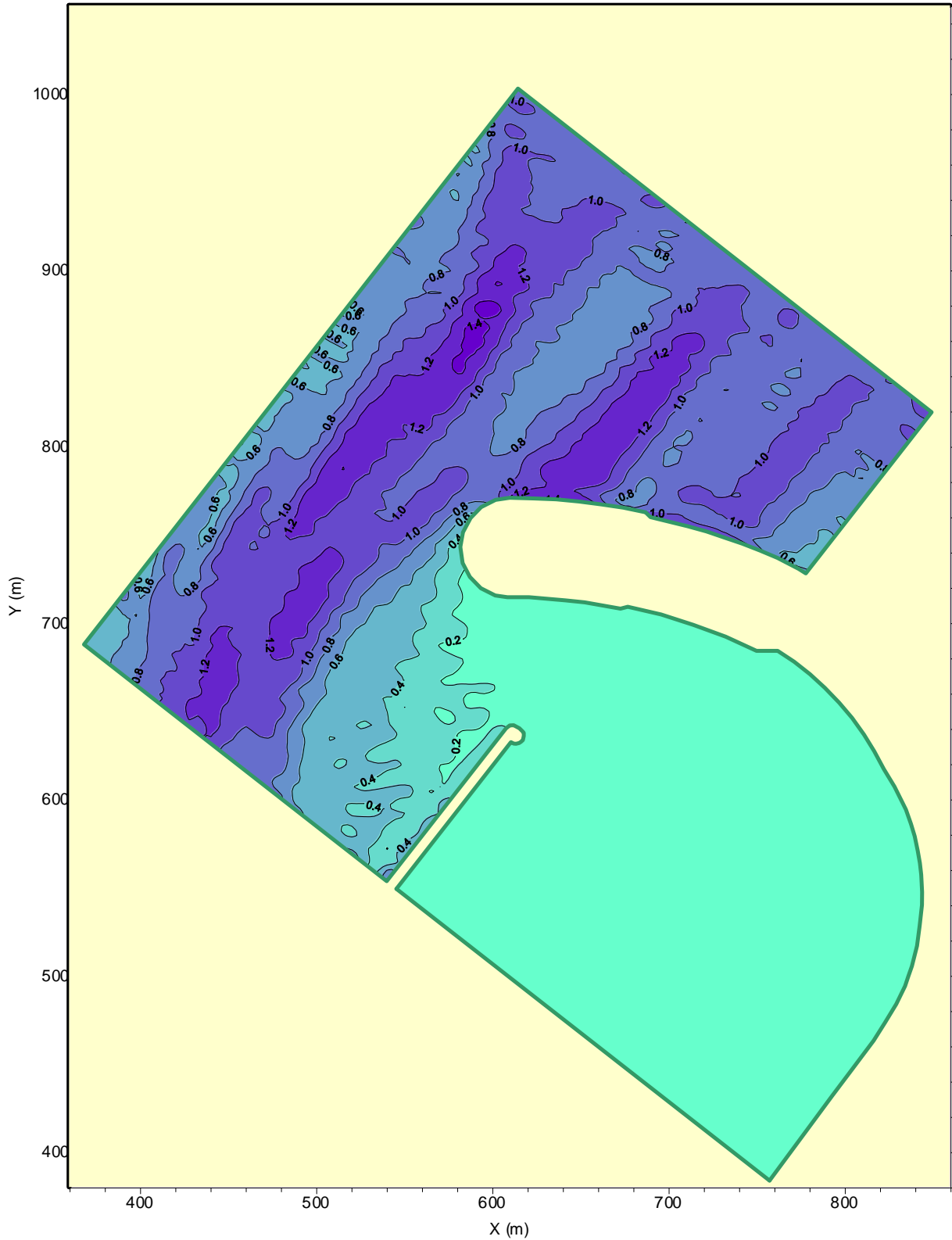


Figura II.6. Configuración II
Escenario 9: Dirección Noreste N=3.00 m Hs=0.95 m Tp=4.5 s

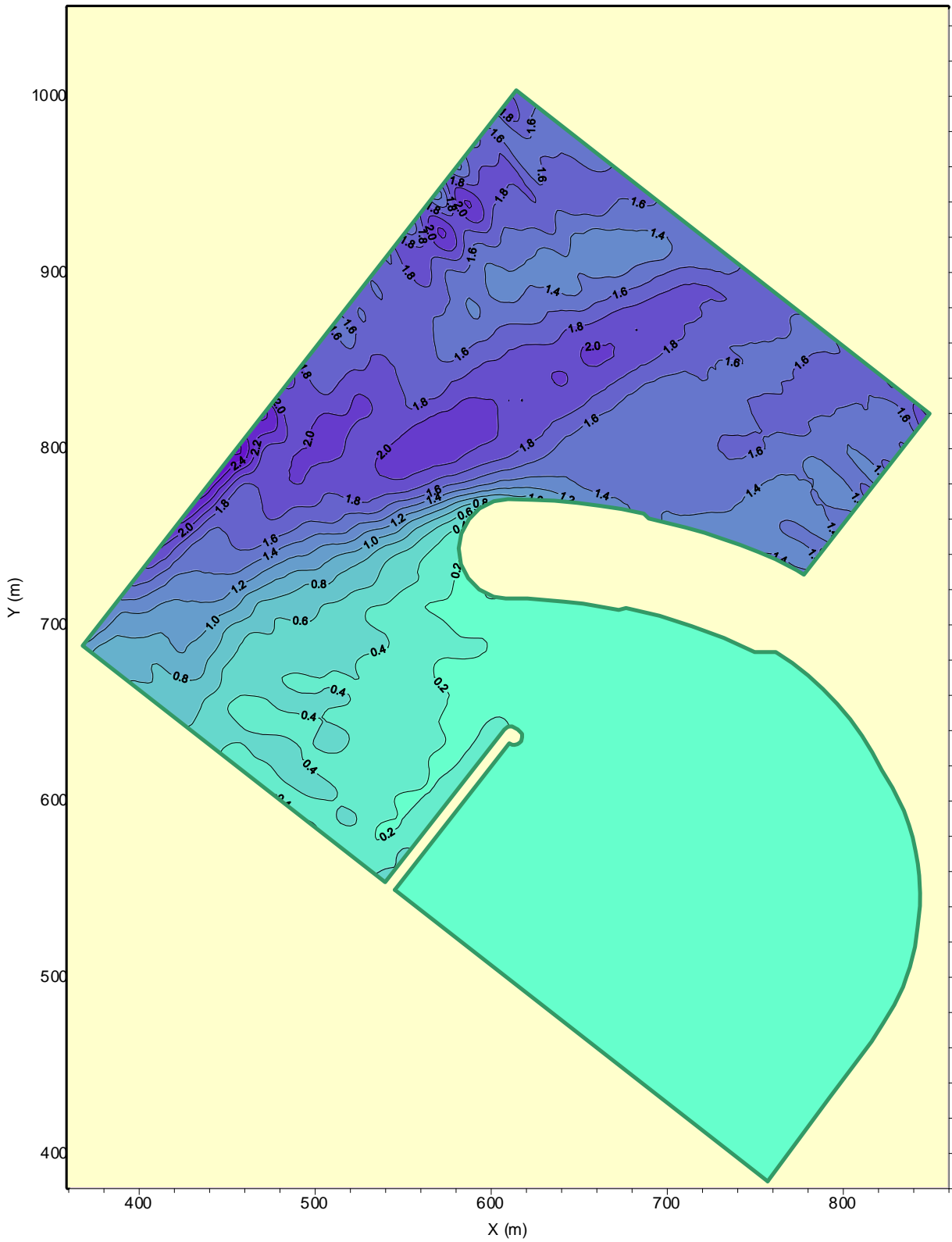


Figura II.7. Configuración II
Escenario 11: Dirección Este N=6.52 m Hs=1.95 m Tp=6.0 s

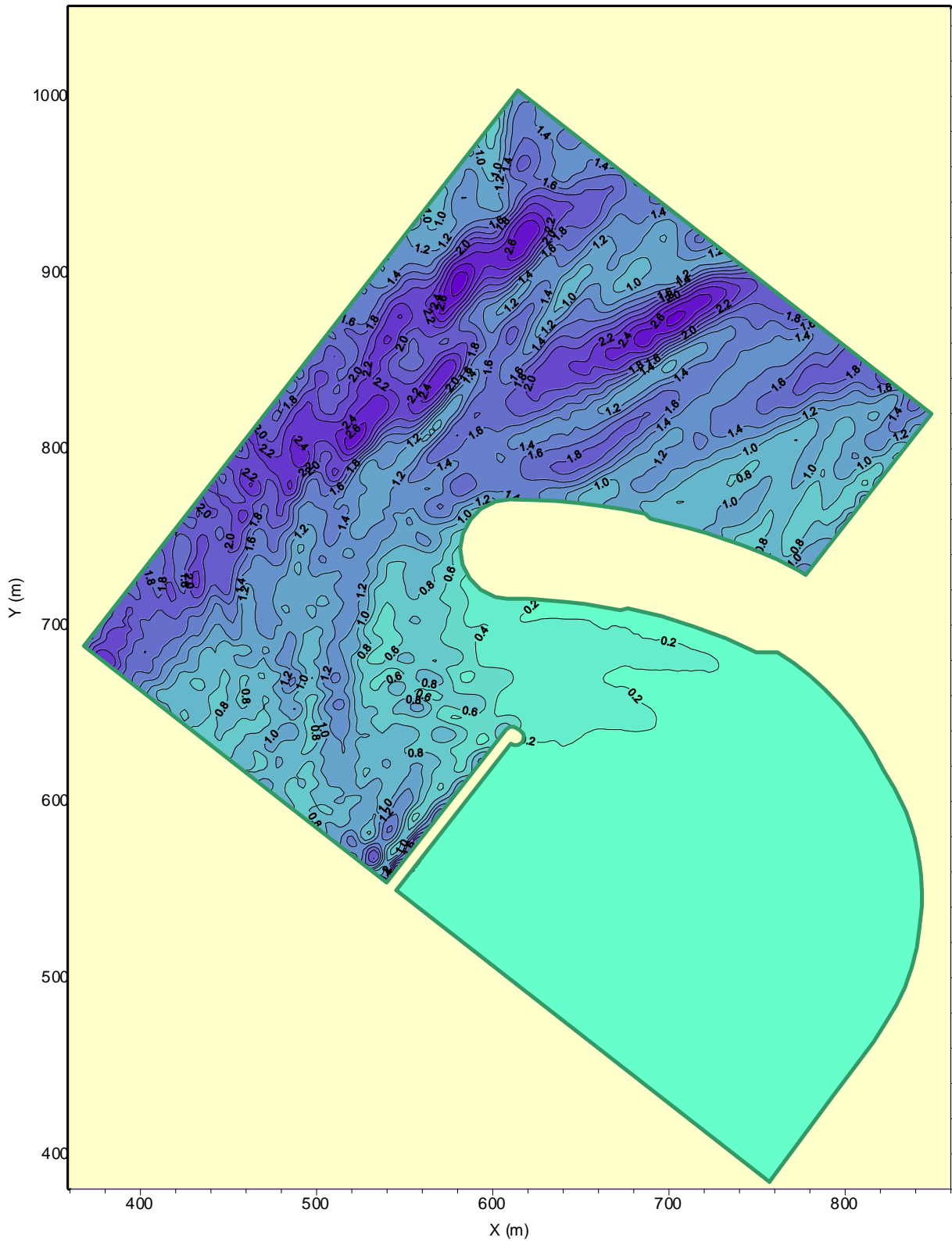


Figura II.8. Configuración II
Escenario 13: Dirección Este $N=0.00$ m $H_s=1.70$ m $T_p=6.0$ s

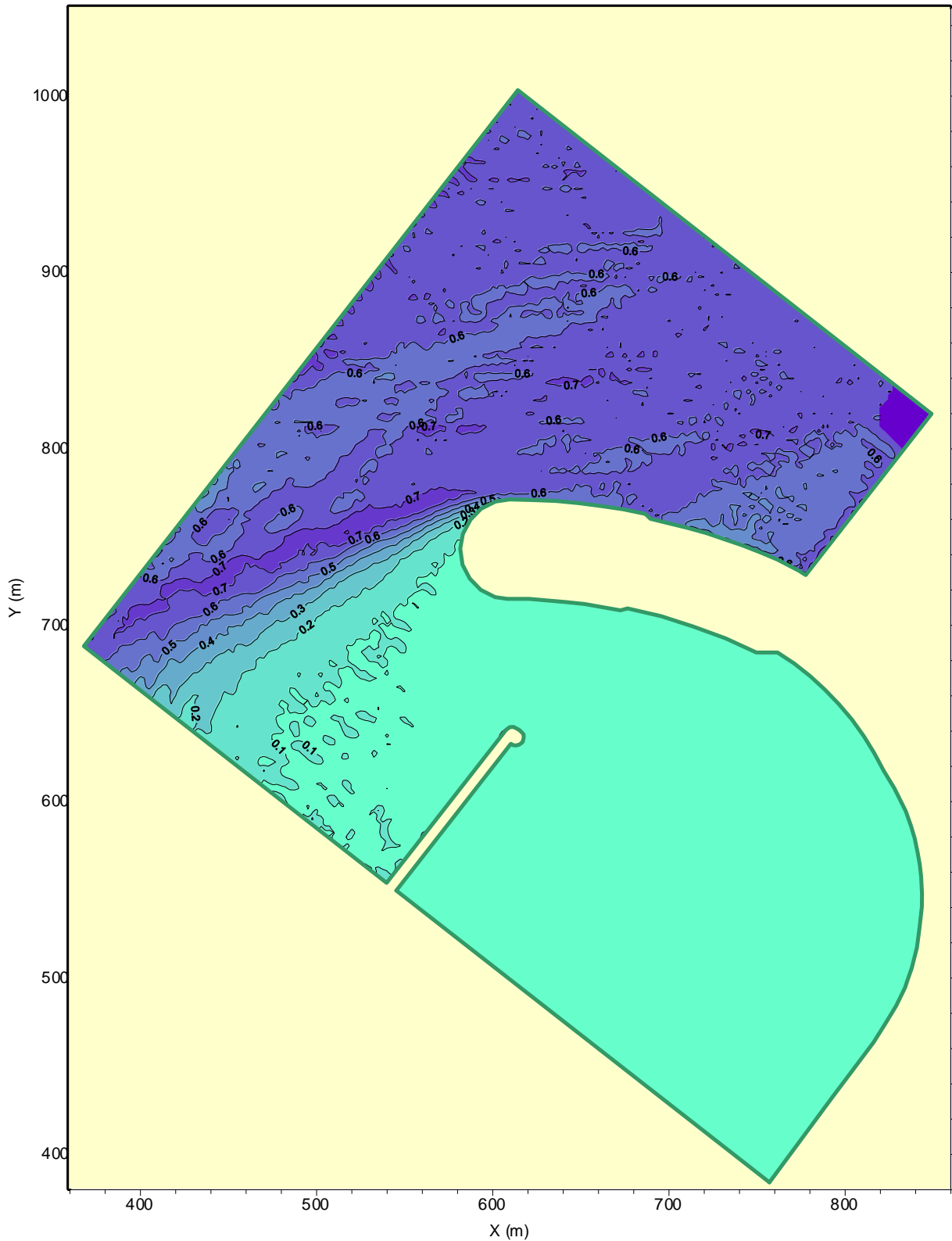


Figura II.9. Configuración II
Escenario 14: Dirección Este N=3.00 m Hs=0.65 m Tp=4.5 s

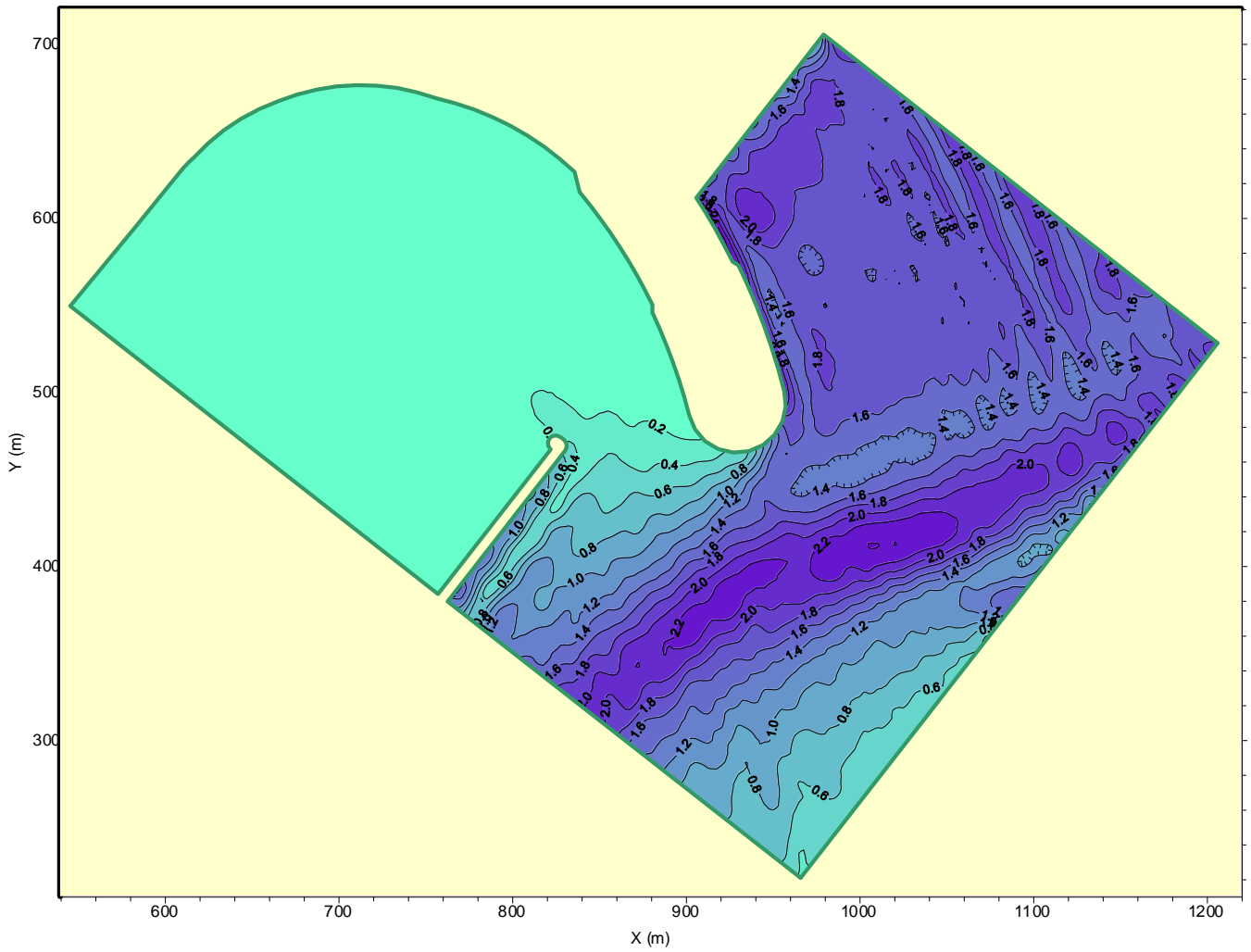


Figura III.1. Configuración III
Escenario 1: Dirección Noreste N=6.52 m Hs=2.08 m Tp=6.0 s

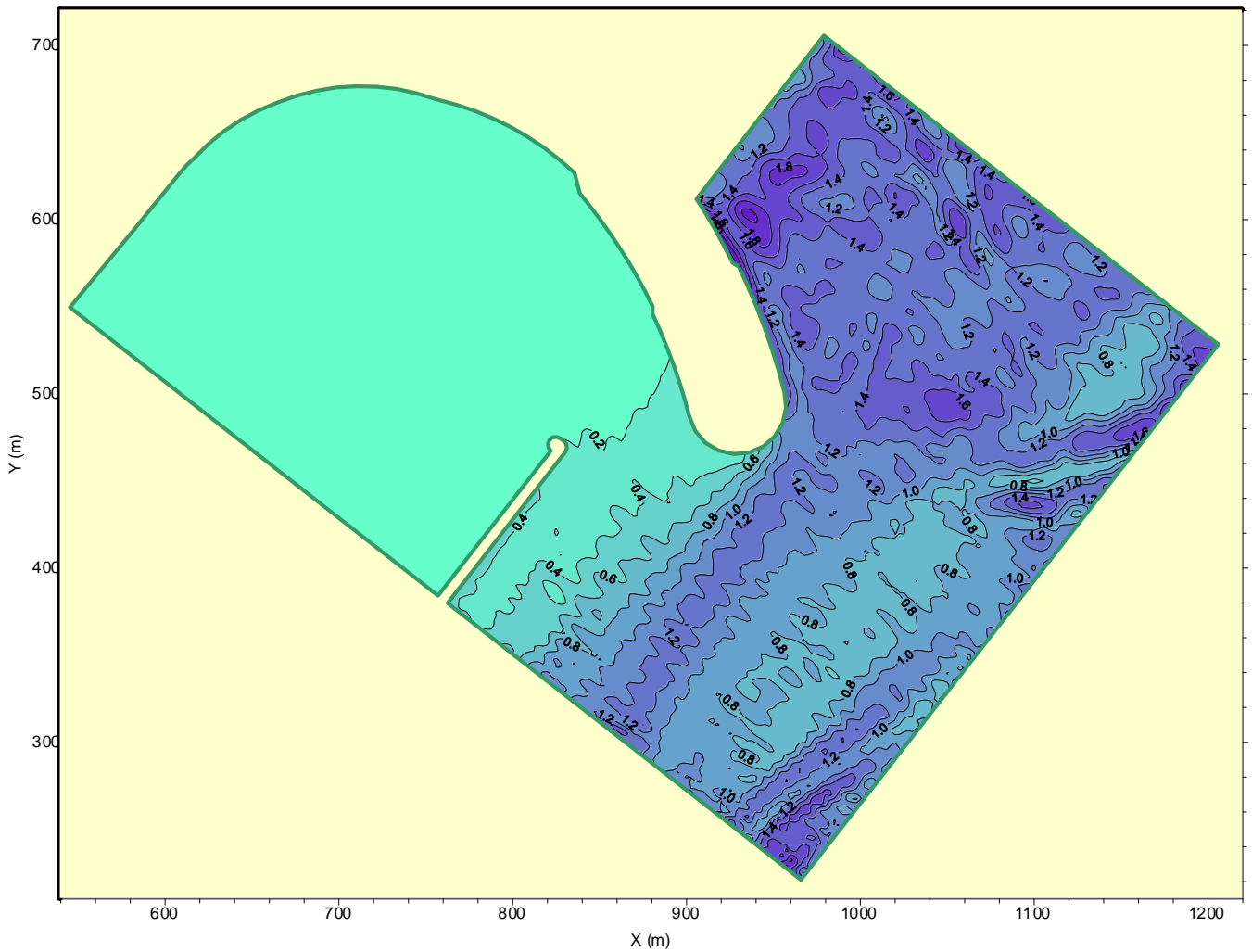


Figura III.2. Configuración III
Escenario 3: Dirección Noreste N=0.00 m Hs=1.70 m Tp=6.0 s

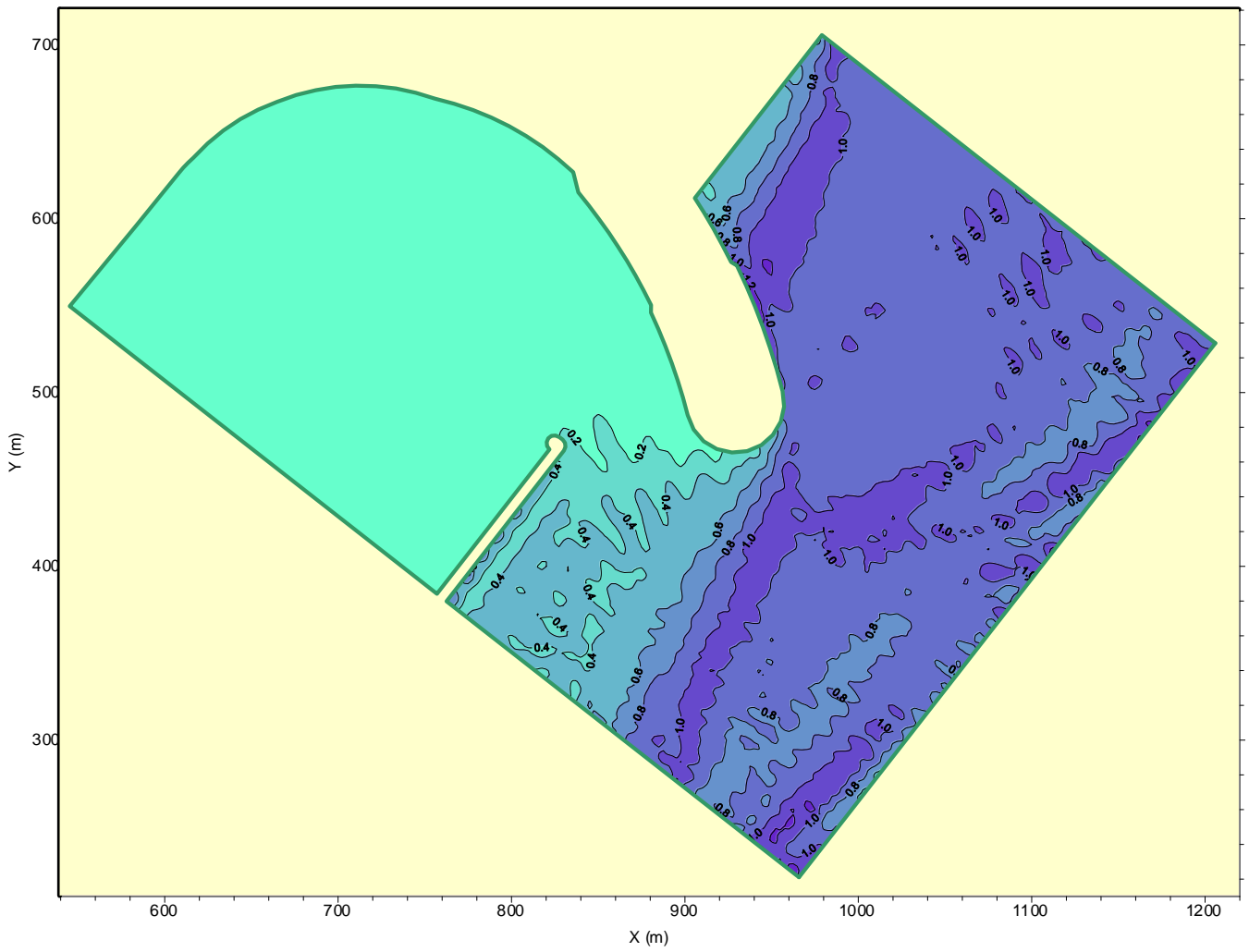


Figura III.3. Configuración III
Escenario 4: Dirección Noreste N=3.00 m Hs=0.95 m Tp=4.5 s

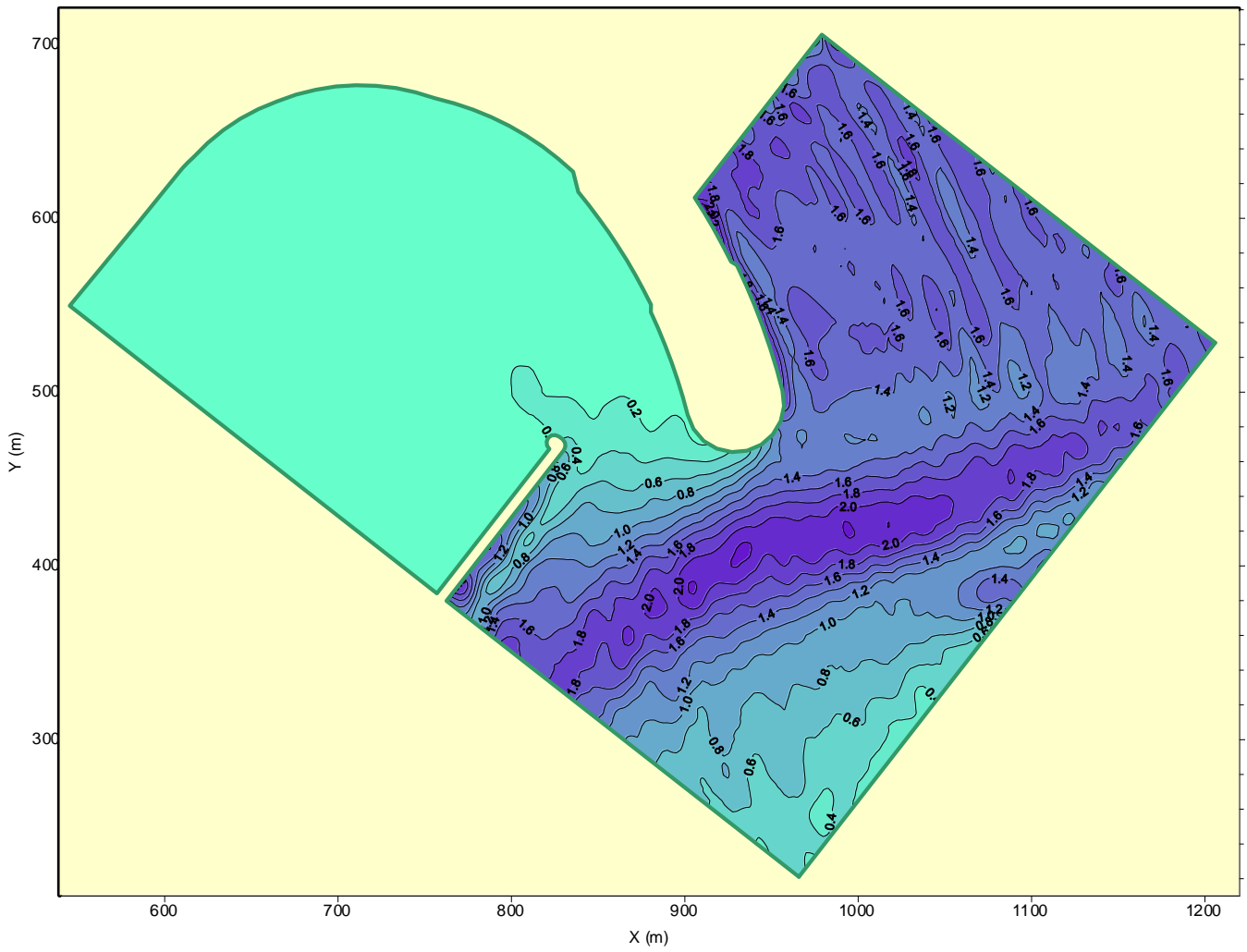


Figura III.4. Configuración III
Escenario 6: Dirección Este N=6.52 m Hs=1.95 m Tp=6.0 s

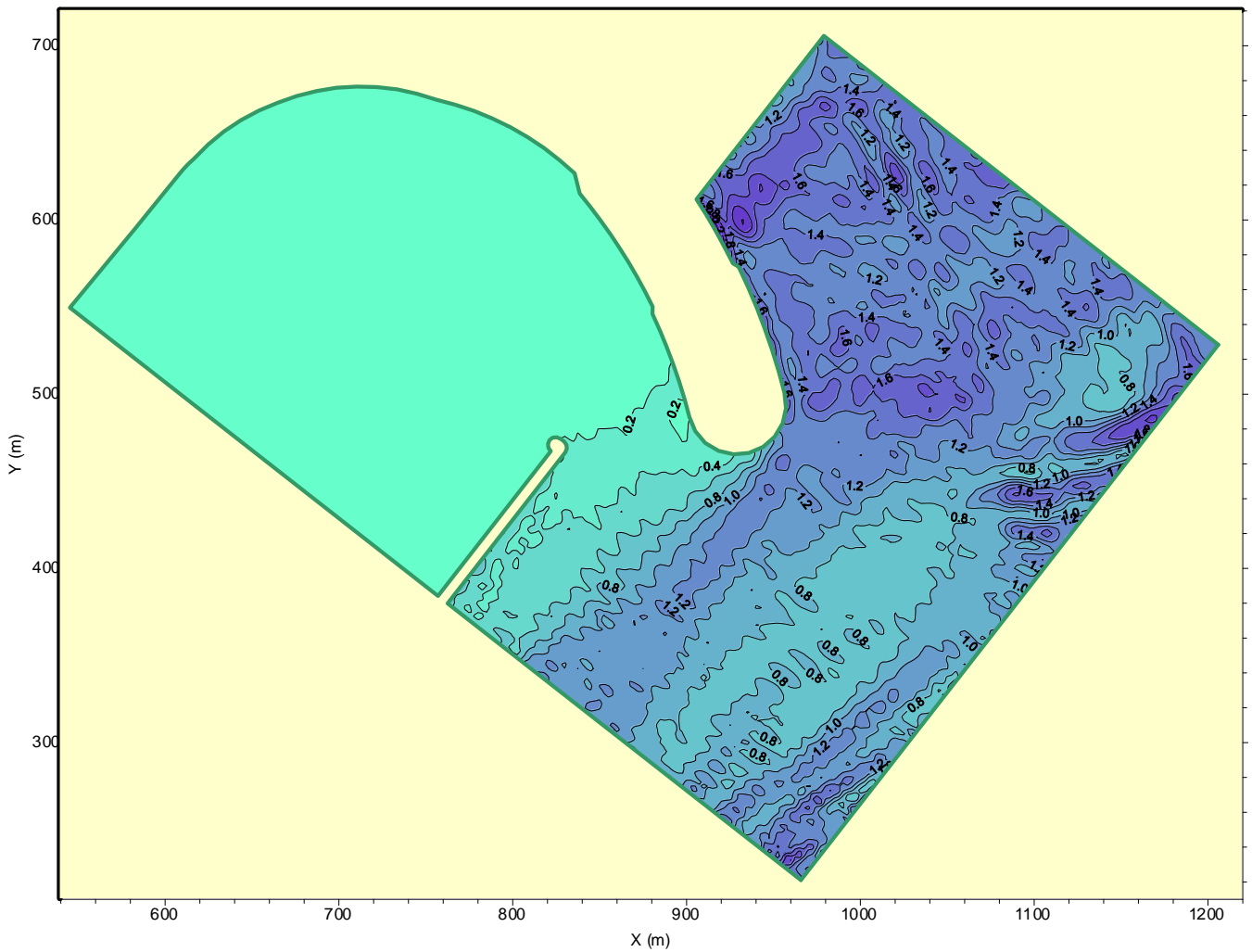


Figura III.5. Configuración III
Escenario 8: Dirección Este N=0.00 m Hs=1.70 m Tp=6.0 s

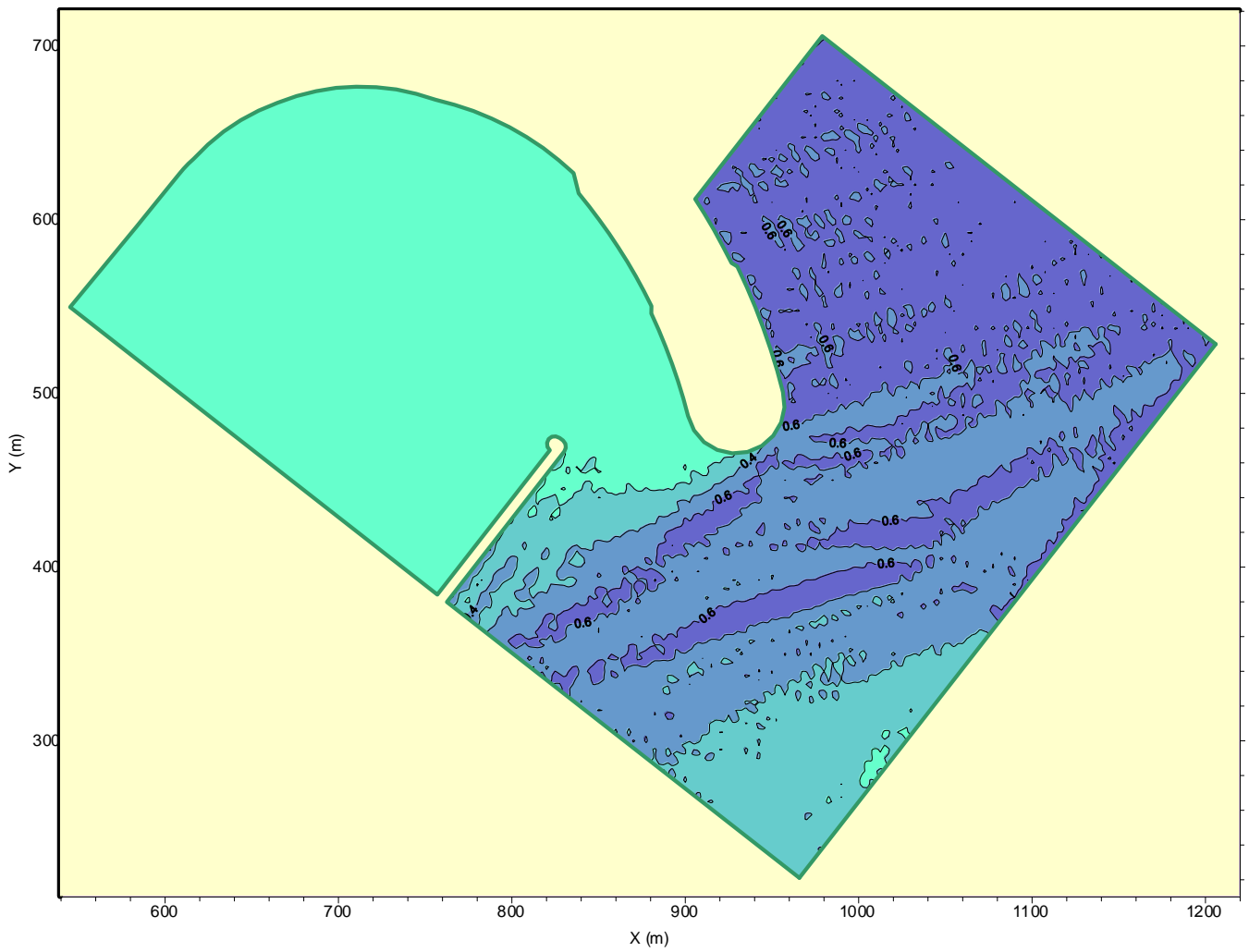


Figura III.6. Configuración III
Escenario 9: Dirección Este $N=3.00$ m $H_s=0.65$ m $T_p=2.85$ s

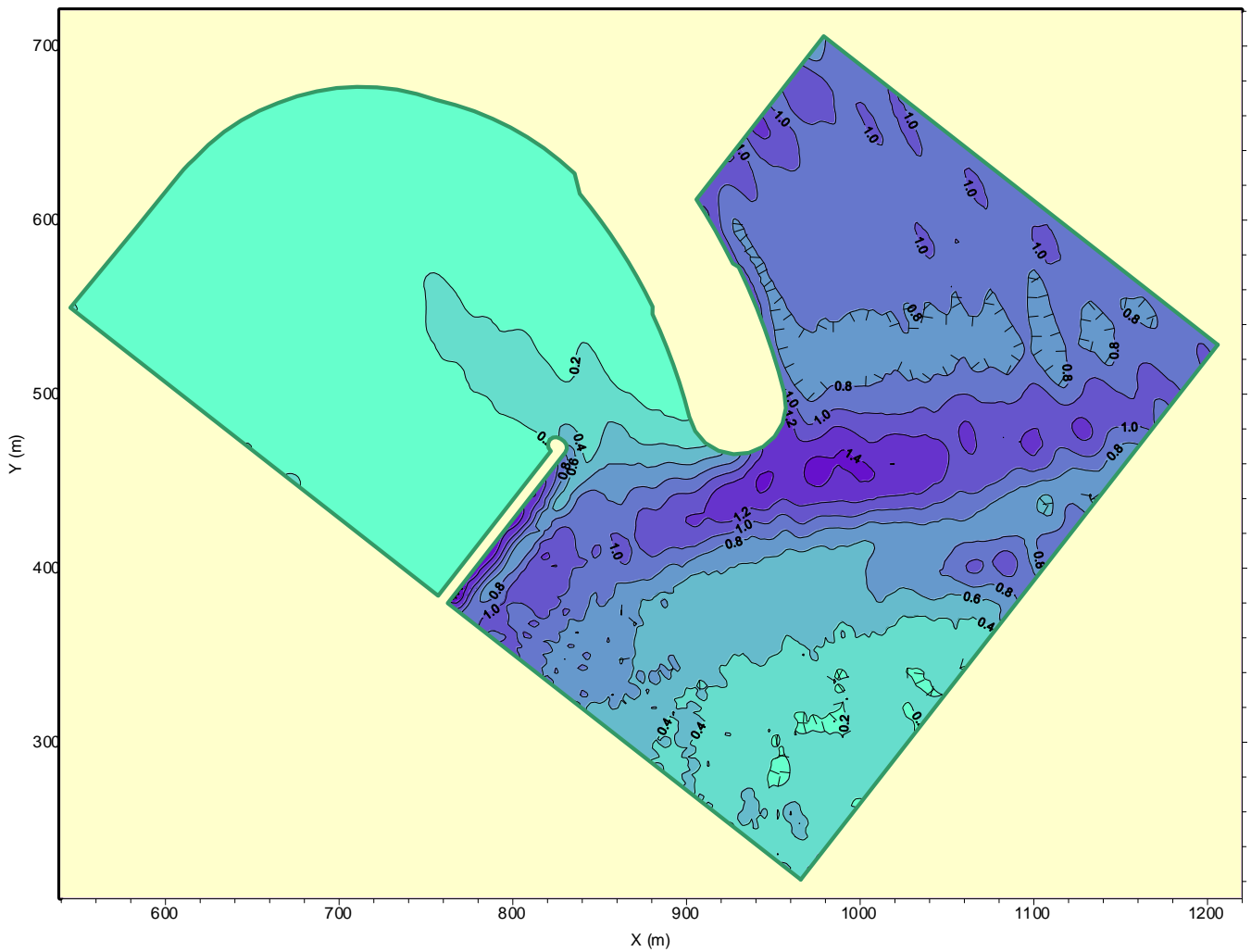


Figura III.7. Configuración III
Escenario 11: Dirección Sudeste N=6.52 m Hs=1.10 m Tp=7.0 s.

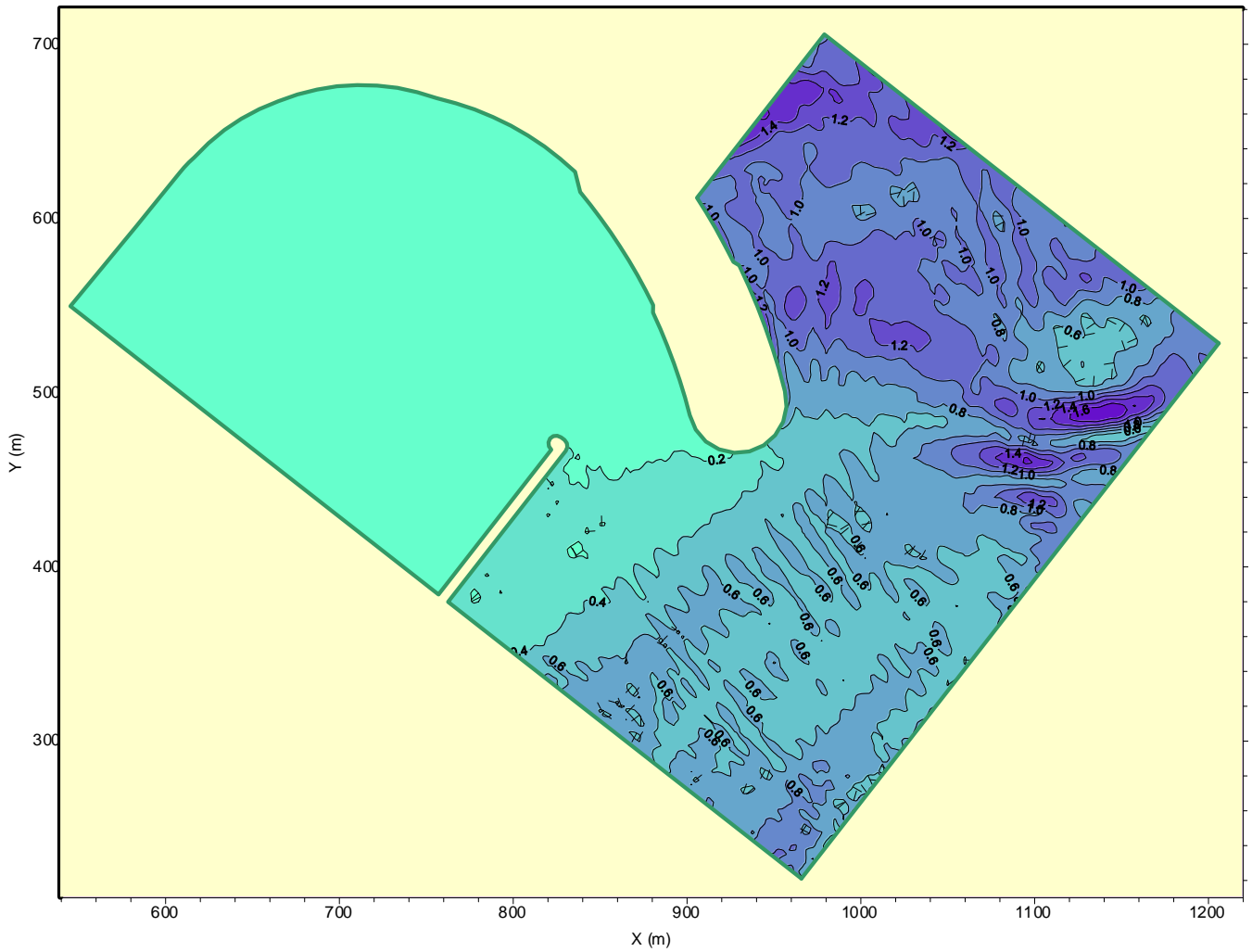


Figura III.8. Configuración III
Escenario 13: Dirección Sudeste $N=0.00$ m $H_s=0.90$ m $T_p=6.0$ s.

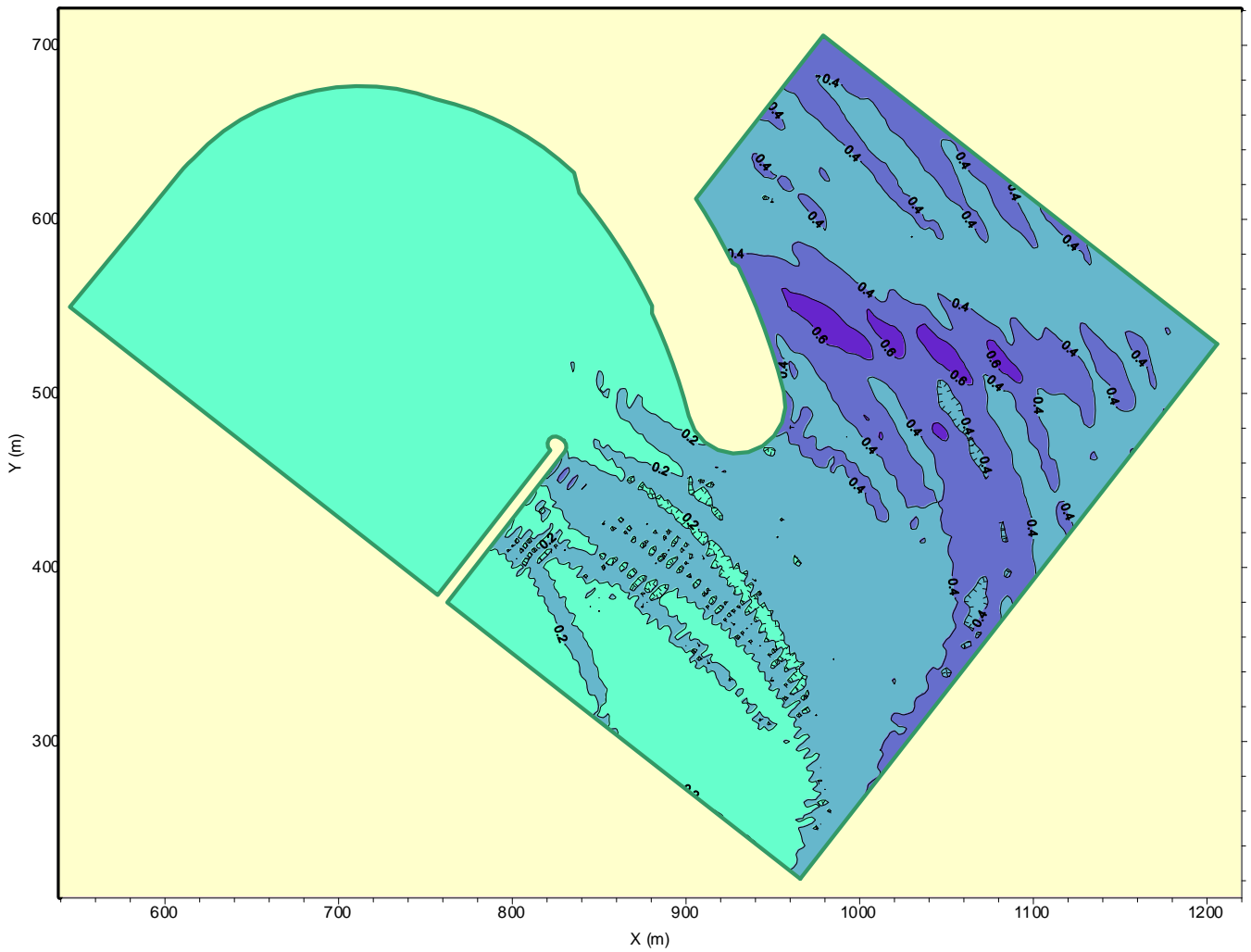


Figura III.9. Configuración III
Escenario 14: Dirección Sudeste $N=3.00$ m $H_s=0.35$ m $T_p=4.5$ s.