

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

Estudio de agitación de olas incidentes provenientes del norte
dentro de la Terminal Portuaria de Manta utilizando MIKE 21

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera Oceanográfica

Presentado por:

María Fernanda Chuez Cedeño

Nicole Lissette Ramírez Ruiz

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mi abuela Alicia Pineda y mi abuelo José Ruiz quienes me guiaron a llegar a esta etapa de mi vida gracias a sus consejos y apoyo. A mi mamá Martha Ruiz, papá Alberto Ramírez y hermanos quienes son mi fortaleza para seguir alcanzando mis sueños. Por otra parte, mi novio Giuseppe Cantore quien con su cariño y apoyo me ha brindado ánimos en este proceso tan arduo.

Llena de mucho orgullo dedico este proyecto a mi familia, mi madre Lilian, mi padre Yury, mi abuela Olivia y mis hermanas Stephany y Daniela, quienes son mis pilares y motivación para que cumpla todas mis metas. A Fernando, por siempre estar para darme fuerzas y seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a nuestro tutor el M.Sc. Iván Saltos que nos guío firmemente en la realización de nuestro proyecto integrador y a nuestros padres que nos han apoyado en toda nuestra etapa universitaria y en cumplir nuestras metas.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *María Fernanda Chuez y Nicole Ramírez* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Nicole Lissette Ramírez
Ruiz

María Fernanda Chuez
Cedeño

EVALUADORES

M. Sc, Luis Miguel Altamirano Pérez

PROFESOR DE LA MATERIA

M. Sc, Iván Marcelo Saltos Andrade

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La Terminal Portuaria de Manta (TPM), es una terminal multipropósito protegida por un espigón y rompeolas que mitigan el oleaje que en su mayoría se aproxima desde el sur y suroeste (S-SW). Con menor frecuencia se reciben olas del norte y noroeste (N-NE). De acuerdo con TPM, el oleaje proveniente del norte, aunque con menor ocurrencia, afecta en la operatividad del puerto y causa daños significativos.

El presente proyecto busca estudiar la agitación de olas incidentes provenientes del norte dentro de la TPM utilizando MIKE 21 para analizar las perturbaciones de ondas que se producen en los atracaderos. Para el desarrollo de este estudio, se realizó la recreación de un evento extremo, El Niño 1997-1998, a través de datos históricos de olas (altura, periodo y dirección) y viento (velocidad y dirección) usando el módulo Spectral Wave (MIKE 21SW). También se utilizó el módulo Boussinesq Wave (MIKE 21BW) para analizar la agitación de olas en la zona de los muelles. Posteriormente a la calibración y validación de los modelos, se realizaron simulaciones para proyecciones del cambio climático 2050 y 2100. Estos escenarios fueron evaluados con el estado actual del rompeolas y adicionalmente con modificaciones (caso 1 y 2) para evaluar el nivel de protección de estas estructuras.

Los resultados indican que con oleaje proveniente de 330° y 360° los coeficientes de perturbación se mantienen por debajo del 11% en todos los atracaderos. Por otro lado, con el oleaje proveniente en las direcciones de 15° y 30° se presentan coeficientes de perturbación mayores al 50% en ambos muelles, sin embargo, estas disminuyen al realizar modificaciones al rompeolas en un promedio del 14%.

Palabras clave: oleaje norte, agitación, ENSO 1997-1998, cambio climático, rompeolas

ABSTRACT

The Terminal Portuaria de Manta (TPM) is a multipurpose terminal protected by a breakwater and breakwaters that mitigate the waves that mostly approach from the south and southwest (S-SW). Waves are received less frequently from the north and northwest (N-NE). According to TPM, the waves coming from the north, although less frequently, affect the operation of the port and cause significant damage.

This project seeks to study the agitation of incident waves coming from the north within the TPM using MIKE 21 to analyze wave disturbances that occur at berths. For the development of this study, the recreation of an extreme event, El Niño 1997-1998, was carried out through historical data of waves (height, period and direction) and wind (speed and direction) using the Spectral Wave module (MIKE 21SW). The Boussinesq Wave module (MIKE 21BW) was also used to analyze wave agitation in the dock area. After the calibration and validation of the models, these simulations were carried out for projections of climate change 2050 and 2100. These were scenarios evaluated with the current state of the breakwater and additionally with modifications (case 1 and 2) to evaluate the level of protection of structures.

The results indicate that with waves coming from 330° and 360° the disturbance coefficients remain below 11% in all berths. On the other hand, with the waves coming in the directions of 15° and 30° , these disturbance coefficients are higher than 50% in both piers, however, they decrease when modifications are made to the breakwater by an average of 14%.

Keywords: north swell, disturbance, ENSO 1997-1998, climate change, breakwater

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	I
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del problema	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Descripción del área de estudio	3
1.4.1 Terminal Portuaria de Manta	3
1.4.2 Climatología y meteorología	5
1.4.3 Vientos	6
1.4.4 Olas	6
1.4.5 Mareas	8
1.4.6 Variabilidad y cambio climático.....	9
1.4.7 Sedimentología.....	9
1.5 Marco teórico	10
1.5.1 Teoría de ondas marinas	10

1.5.2	Generación del oleaje.....	12
1.5.3	Transformación del oleaje.....	13
1.5.4	Perturbación de olas en puertos	14
1.5.5	Estructuras de protección en puertos	17
1.5.6	Modelos numéricos computacionales hidrodinámicos	17
CAPÍTULO 2.....		21
2.	METODOLOGÍA	21
2.1	ETAPA 1: Recolección de información.....	23
2.1.1	Datos del WAVEWATCH III.....	23
2.1.2	Batimetría	24
2.2	ETAPA 2: Generación de archivos de entrada en MIKE Zero	24
2.2.1	Digitalización de batimetría y generación de malla	24
2.2.2	Serie de tiempo	26
2.2.3	Caja de herramientas	26
2.3	ETAPA 3: Oleaje en aguas profundas utilizando MIKE 21 SW.....	27
2.3.1	Paso 1: Preparar archivos de ingreso	27
2.3.2	Paso 2: Ingresar parámetros básicos	28
2.3.3	Paso 3: Ingresar parámetros del SW	28
2.3.4	Paso 4: Generar archivos de salida	30
2.4	ETAPA 4: Oleaje en aguas someras con MIKE 21 BW	31
2.4.1	Paso 1: Preparar archivos de ingreso	32
2.4.2	Paso 2: Ingresar parámetros básicos	32
2.4.3	Paso 3: Ingresar parámetros de calibración.....	33
2.4.4	Paso 4: Generación de archivos de salida	36
2.5	ETAPA 5: Calibración y Validación de los modelos.....	36
2.6	ETAPA 6: Generación de escenarios	37
2.6.1	Condiciones de oleaje	38

2.6.2	Modificaciones del rompeolas en MIKE 21	38
CAPÍTULO 3	.....	40
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	.....	40
3.1	Resultados de la ETAPA 1	40
3.1.1	Datos del WAVEWATCH III	40
3.2	Resultados de la ETAPA 5.....	42
3.2.1	Calibración y validación: MIKE 21 SW	42
3.2.2	Calibración y validación: MIKE 21 BW	45
3.3	Resultados de la ETAPA 6.....	46
3.3.1	Oleaje ENSO: estado actual	49
3.3.2	Oleaje ENSO + cambio climático: estado actual	53
3.3.1	Oleaje ENSO: rompeolas modificado Caso 1	59
3.3.2	Oleaje ENSO + cambio climático: rompeolas modificado caso 1 ..	62
3.3.3	Oleaje ENSO: rompeolas modificado caso 2	68
3.3.4	Oleaje ENSO + cambio climático: rompeolas modificado caso 2 ..	71
3.4	Análisis de la ETAPA 6	76
3.5	Análisis de costos	78
CAPÍTULO 4	.....	80
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	.....	80
4.1	Conclusiones	80
4.2	Recomendaciones	82
BIBLIOGRAFÍA	.....	84
APÉNDICES	.....	89

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
TPM	Terminal Portuaria de Manta
APM	Autoridad Portuaria de Manta
INOCAR	Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
SNGRE	Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias
SW	Spectral Wave
BW	Boussinesq Wave
WWIII	WAVEWATCH III
ENSO	El Niño-Oscilación del Sur
CC	Cambio Climático
TSM	Temperatura Superficial del Mar
HWL	High Water Level
LWL	Low Water Level
MHWS	Mean High Water Springs
MHWN	Mean High Water Neaps
MLWN	Mean Low Water Neaps
MLWS	Mean Low Water Springs

SIMBOLOGÍA

m	Metro
s	Segundo
h	Hora
Hs	Altura significativa de ola
Hmo	Altura significativa de oleaje
T	Periodo
Ha	Hectárea
t	Tonelada
mbar	milibar
°C	Celsius

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la Terminal Portuaria de Manta (Autoras, 2021).....	4
Figura 1.2 Equipamiento Portuario de TPM (Autoras, 2021)	5
Figura 1.3 Dirección y velocidad de viento (Autoras, 2021).....	6
Figura 1.4 Dirección y velocidad de oleaje (Autoras, 2021).....	8
Figura 1.5 Refracción de las olas cerca de la costa debido a un cambio en la profundidad del agua (Pecher & Kofoed, 2017).....	13
Figura 1.6 Efecto de difracción de olas (Shore Protection Manual, 1984)	15
Figura 1.7 Efecto de reflexión de olas en Hamlin Beach, New York (Shore Protection Manual, 1984)	16
Figura 1.8 Modelos de promedian la fase (Deltares, 2018)	18
Figura 1.9 Modelos que resuelven la fase (Deltares, 2018)	19
Figura 1.10 Procesos costeros desde la condición de aguas profundas a la costa (MIKE 21 BW)	20
Figura 2.1 Metodología implementada (Autoras, 2021)	22
Figura 2.2 Ubicación de la boya de mar del WW III en relación a la TPM (Autoras, 2021).....	23
Figura 2.3 Generación de malla e interpolación de la batimetría (Autoras, 2021)	25
Figura 2.4 Malla para modelo SW (Autoras, 2021).....	25
Figura 2.5 Batimetría para modelo BW (Autoras, 2021)	26
Figura 2.6 Proceso utilizado para la simulación del módulo SW (Autoras, 2021)	27
Figura 2.7 Dominio del área de estudio (Autoras, 2021)	28
Figura 2.8 Ingreso de archivo de viento (Autoras, 2021)	29
Figura 2.9 Visualización geográfica de las condiciones de borde con los respectivos códigos y colores (Autoras, 2021)	30
Figura 2.10 Definición del tipo de condición para cada borde (Autoras, 2021) ..	30
Figura 2.11 Archivos de salida del modelo SW (Autoras, 2021)	31
Figura 2.12 Proceso utilizado para la simulación del modelo BW (Autoras, 2021)	31
Figura 2.13 Línea de generación de la onda interna (Autoras, 2021)	34
Figura 2.14 Capa de porosidad (Autores, 2021).....	35

Figura 2.15 Capa de esponja (Autoras, 2021)	35
Figura 2.16 Archivos de salida del modelo BW (Autoras, 2021)	36
Figura 2.17 Proceso de calibración y validación del modelo BW. (Autoras, 2021)	37
Figura 2.18 Escenarios para la modelación con MIKE 21 BW (Autoras, 2021)	38
Figura 2.19 Caso 1: Alargamiento de 200 m (Autoras, 2021)	39
Figura 2.20 Caso 2: Alargamiento de 200 m y extensión de 100 m (Autoras, 2021)	39
Figura 3.1 Altura significativa y dirección de oleaje del norte del WAVEWATCH III para condiciones ENSO en el período de 1997-1998 (Autoras, 2021)	40
Figura 3.2 Velocidad y dirección del viento para direcciones de oleaje proveniente del norte del WW III en condiciones ENSO en el período de 1997- 1998 (Autoras, 2021)	41
Figura 3.3 Histograma de períodos de olas para 1997-1998 en condiciones ENSO para olas provenientes del norte (Autoras, 2021)	41
Figura 3.4 Altura significativa de oleaje en condiciones ENSO (Autoras, 2021)	42
Figura 3.5 Periodo pico de oleaje en condiciones ENSO (Autoras, 2021)	43
Figura 3.6 Dirección de oleaje proveniente del Noroeste en condiciones ENSO (Autoras, 2021)	43
Figura 3.7 Altura significativa de oleaje para cambio climático con proyección 2050 (Autoras, 2021)	44
Figura 3.8 Altura significativa de oleaje para cambio climático con proyección 2100 (Autoras, 2021)	44
Figura 3.9 Puntos escogidos para validación en diagrama de difracción (Autoras, 2021).....	46
Figura 3.10 Altura significativa y dirección del oleaje del MIKE 21SW en condiciones ENSO en el periodo de 1997-1998 (Autoras,2021)	47
Figura 3.11 Histograma de periodo pico del SW en condiciones ENSO en el periodo de 1997-1998 (Autoras, 2021).....	47
Figura 3.12 Altura significativa y dirección del oleaje del MIKE 21SW en CC para 2050 (Autoras, 2021)	48
Figura 3.13 Altura significativa y dirección del oleaje MIKE 21SW en CC 2100 (Autoras, 2021)	48

Figura 3.14 Puntos de análisis para coeficientes de perturbación (Autoras, 2021)	49
Figura 3.15 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 330° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)	50
Figura 3.16 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)	51
Figura 3.17 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)	51
Figura 3.18 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)	52
Figura 3.19 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)	52
Figura 3.20 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	53
Figura 3.21 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	54
Figura 3.22 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	54
Figura 3.23 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	55
Figura 3.24 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	55
Figura 3.25 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	56
Figura 3.26 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	56

Figura 3.27 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021).....	57
Figura 3.28 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021).....	57
Figura 3.29 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021).....	58
Figura 3.30 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 330° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)	59
Figura 3.31 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 360° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)	60
Figura 3.32 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 15° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)	60
Figura 3.33 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 30° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)	61
Figura 3.34 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 60° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)	61
Figura 3.35 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	63
Figura 3.36 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	63
Figura 3.37 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	64
Figura 3.38 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	64
Figura 3.39 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	65

Figura 3.40 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	65
Figura 3.41 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	66
Figura 3.42 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	66
Figura 3.43 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	67
Figura 3.44 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	67
Figura 3.45 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 330° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)	68
Figura 3.46 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 360° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)	69
Figura 3.47 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 15° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)	69
Figura 3.48 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 30° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)	70
Figura 3.49 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 60° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)	70
Figura 3.50 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	71
Figura 3.51 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	72
Figura 3.52 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	72

Figura 3.53 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	73
Figura 3.54 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)	73
Figura 3.55 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	74
Figura 3.56 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	74
Figura 3.57 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	75
Figura 3.58 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	75
Figura 3.59 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	76
Figura 3.60 Coeficiente de perturbación promedio en los atracaderos - ENSO (Autoras, 2021)	77
Figura 3.61 Coeficiente de perturbación promedio en los atracaderos - Condición ENSO + Cambio Climático Proyección 2050 (Autoras, 2021)	78
Figura 3.62 Coeficiente de perturbación promedio en los atracaderos - Condición ENSO + Cambio Climático Proyección 2100 (Autoras, 2021)	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Niveles de marea en Manta (INOCAR, 2021)	9
Tabla 2.1 Rango de valores obtenidos a partir de la estadística de olas (Autoras, 2021).....	23
Tabla 3.1 Altura de oleaje en Jaramijó veril 20 – Validación SW (Autoras, 2021)	42
Tabla 3.2 Período de oleaje en Jaramijó veril 20 – Validación SW (Autoras, 2021)	42
Tabla 3.3 Parámetros de calibración BW (Autoras, 2021)	45
Tabla 3.4 Altura de ola difractada dentro de TPM – Comparación entre los resultados del módulo BW y diagramas SPM 1984 (Autoras, 2021)	45
Tabla 3.5 Coordenadas de puntos de análisis para coeficientes de perturbación (Autoras, 2021)	49
Tabla 3.6 Coeficiente de perturbación de olas (%) en los atracaderos de TPM (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021).....	53
Tabla 3.7 Coeficiente de perturbación de olas (%) para los atracaderos de TPM (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)	58
Tabla 3.8 Coeficiente de perturbación de olas (%) en los atracaderos de TPM (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021).....	62
Tabla 3.9 Coeficiente de perturbación de olas (%) para los atracaderos de TPM (Caso 1: Proyección 2050 y 2100) (Autoras, 2021)	68
Tabla 3.10 Coeficiente de perturbación de olas (%) en los atracaderos de TPM (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021).....	71
Tabla 3.11 Coeficiente de perturbación de olas (%) para los atracaderos de TPM (Caso 2: Proyección 2050 y 2100) (Autoras, 2021)	76
Tabla 3.12 Costos de los insumos utilizados para la realización del proyecto (Autoras, 2021)	79

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La función primordial que tienen los puertos es proporcionar el atraque seguro de las embarcaciones y facilitar la fluidez en la movilidad de la carga entre los buques a tierra cercana (Panigrahi et al., 2015). A partir de la información proporcionada por el Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada (INOCAR) y el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE), las costas ecuatorianas presentan oleajes y aguajes fuertes en los meses de diciembre, enero y febrero (Consulsua, 2017), en el cual los oleajes del norte son poco recurrentes, con esto, la Terminal Portuaria de Manta (TPM) se ve afectada por el incremento de agitación en la zona interior del puerto lo que impide que los buques atraquen con normalidad a los muelles y disminuya la eficiencia en las operaciones portuarias. Por tal motivo, analizar la dinámica de las olas costa afuera y realizar la transformación del oleaje hasta los muelles es una tarea fundamental para mejorar en la eficiencia de las operaciones (Panigrahi et al., 2015).

En este estudio se llevan a cabo simulaciones numéricas para estudiar la agitación de las olas incidentes del norte dentro de la TPM tomando en consideración escenarios extremos. Los datos de olas son obtenidos por medio de la plataforma WAVEWATCH III y se realizan las simulaciones con los modelos de MIKE 21, en el cual, la transformación del oleaje hacia la zona costera se analiza utilizando el modelo de olas espectrales mientras que la agitación de olas se evalúa con el modelo de Boussinesq.

1.1 Descripción del problema

De acuerdo con la información revisada, las olas que viajan desde aguas profundas hasta la costa cerca de Manta provienen principalmente desde el sur y suroeste (S-SW). La TPM está protegida por un espigón y rompeolas que mitigan el oleaje que se aproxima en estas direcciones. Por otro lado, con menor frecuencia se reciben olas del norte y noroeste (N-NE). De acuerdo con TPM, el

oleaje proveniente del norte, aunque con menor ocurrencia ha afectado las operaciones del puerto y causado daños significativos. Este oleaje, provoca que las embarcaciones que están atracadas presenten balanceo, se rompan las líneas de amarre y a su vez las cornamusas que están instaladas en los muelles, lo que conlleva a retrasos en la operación y logística del puerto.

El presente proyecto busca estudiar la agitación de olas incidentes provenientes del norte dentro de la TPM utilizando MIKE 21 para analizar las perturbaciones de ondas que se producen en los atracaderos.

1.2 Justificación del problema

Las actividades que desarrolla la TPM son primordiales para el desarrollo comercial, productivo y social de la provincia y el país. De acuerdo con la problemática analizada, es importante para la terminal comprender el clima de olas del norte que inciden en sus facilidades y que afectan en la operatividad de los muelles internacionales. Para esto se realizaron simulaciones de agitación de olas incidentes del norte sobre la terminal basados en el evento extremo de El Niño (ENSO) 1997-1998. Posteriormente a que el modelo computacional estuvo calibrado y validado, se realizaron posibles escenarios en donde se incluía los efectos del cambio climático (ej. Incremento del nivel del mar y altura de ola) hacia el año 2050 y 2100. Los resultados generados en este estudio servirán de referencia para los planificadores portuarios en la toma de decisiones para la configuración del rompeolas en la reducción de los impactos negativos del oleaje con el fin de que la TPM no esté expuesta a pérdidas económicas y comprometa su eficiencia.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Estudiar la agitación de ondas que se producen en la zona de los muelles de la Terminal Portuaria de Manta como resultado del clima de olas provenientes del norte utilizando MIKE 21 para mejorar la toma de decisiones a los planificadores portuarios en la configuración del rompeolas.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Recolectar información bibliográfica, de batimetría y datos del WAVEWATCH III en el área de estudio.
2. Generar archivos de entrada como la batimetría, malla, series de tiempo, onda interna, capa porosa y de esponja.
3. Calibrar y validar los modelos SW y BW a partir de información disponible como son referencias bibliográficas y diagramas de difracción respectivamente.
4. Analizar la interacción no lineal de ondas dentro de los muelles internacionales bajo condiciones ENSO 1997-1998 y simular posibles escenarios incluyendo cambio climático hacia los años 2050 y 2100.

1.4 Descripción del área de estudio

1.4.1 Terminal Portuaria de Manta

La TPM está ubicada en la ciudad de Manta, provincia de Manabí, con coordenadas de 0°56'27.85"S y 80°43'40.50"O como se muestra en la Figura 1.1. Se sitúa a 25 millas náuticas de la ruta internacional de tráfico y a 600 millas náuticas del Canal de Panamá (MTOP & APM, 2018). La TPM es considerada una terminal multipropósito, puesto que moviliza carga a granel sólido, graneles líquidos y carga general (APM, 2020); capta tráfico de las rutas del lejano oriente y del continente americano, en especial las que están relacionadas a la costa del Pacífico (MTOP & APM, 2018). Su estratégica posición facilita la concentración de carga que tiene como destino cruzar el canal de Panamá hacia el continente oeste, Europa y África.

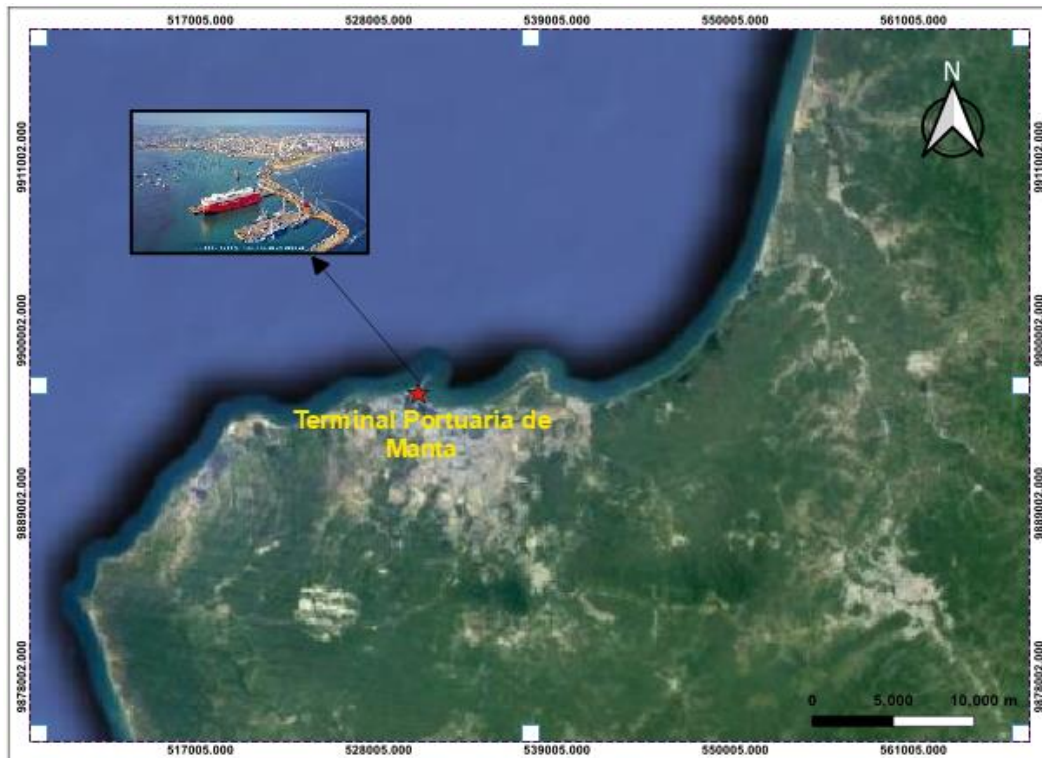


Figura 1.1 Ubicación de la Terminal Portuaria de Manta (Autoras, 2021)

Goza de una posición central respecto a otras terminales portuarias ecuatorianas. La zona de influencia que tiene el puerto no tiene límites, puesto que se extiende a otras provincias de las costa y sierra que aprovechan de este para realizar sus actividades de comercio exterior (Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2019). Al ser una terminal multipropósito, sus instalaciones le facilitan el acceso a todo tipo de embarcaciones, siendo fácil la maniobra de los buques y operaciones de carga, descarga y avituallamiento, además servicio de seguridad y movilidad en la llegada de cruceros y turistas (Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2019).

El área delegada por TPM cuenta con cuatro patios y bodegas de almacenamiento (contenedores, vehículos y carga general) con un área total de 18.68 hectáreas, además cuenta con dos muelles internacionales. El muelle 1 presenta dimensiones de 200 m de largo y 45 m de ancho y el muelle 2 presenta dimensiones de 300 m de largo y 45 m de ancho, ambos tienen una resistencia de 4 t/m, el atracadero 1 tiene una profundidad de 11.5 m (MLWS), los atracaderos 2, 3 y 4 tienen una profundidad de 12.5 m (MLWS). Los atracaderos suman 1000 m capaces de recibir al mismo tiempo embarcaciones de gran

eslora (comerciales, turísticas, pesqueras, entre otras) (TPM, 2020). Por otra parte, cuenta con un dique de abrigo que este compuesto por un espigón de 683.51 m de longitud y un rompeolas de 313.98 m de longitud. La dársena consta de 110 ha que está resguardada por el dique de abrigo que permite con facilidad la operación y logística portuaria (Ministerio de Transporte y Obras Publicas, 2019) (ver Figura 1.2).



Figura 1.2 Equipamiento Portuario de TPM (Autoras, 2021)

1.4.2 Climatología y meteorología

Manabí cuenta variaciones poco significativas de temperatura entre 24 °C a 26 °C, esto se debe porque está situada en la región ecuatorial considerada isotermal (Cartaya, Zurita, & Montalvo, s.f.). La presión atmosférica varia en un rango de 1008 mbar a 1012 mbar aproximadamente. La TSM indican una tendencia estacional. Los meses más cálidos corresponden a febrero y marzo, con un promedio de 27.3 °C y los meses de menor temperatura a la época seca, siendo agosto el mes más frío, con una temperatura de 24.5 °C (NOAA, s.f.). Durante el evento de El Niño 1997-1998 corresponden los años más cálidos, con un promedio anual de 27.0 °C y 27.1 °C.

1.4.3 Vientos

En la Figura 1.3, se muestran los datos de dirección de viento en un periodo desde 1997 hasta 2019. Los datos fueron obtenidos del modelo WWIII (NOAA), para una boya virtual ubicada en las coordenadas 81°W - 0°. De acuerdo con los datos, se aprecia que hay predominancia de vientos del suroeste (SW) entre 210° a 270° con velocidades que van desde los 2 m/s hasta 10 m/s.

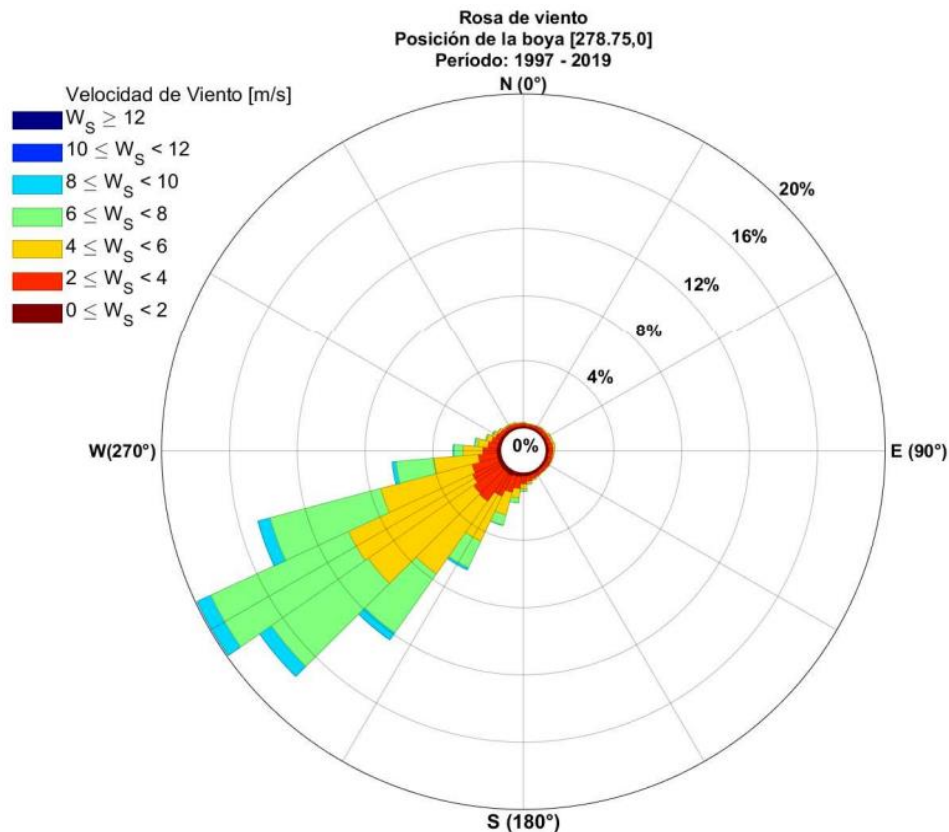


Figura 1.3 Dirección y velocidad de viento (Autoras, 2021)

1.4.4 Olas

Las olas que inciden sobre la costa del Ecuador son producidas en los centros de alta presión atmosférica (Fetch), que en el norte está ubicada en los 35°N-140°W y en el hemisferio sur en los 30°S-50°W (Consulsua, 2017). Durante los meses de enero a mayo los más predominantes son los frentes del norte (N), pero de junio a diciembre son predominantes los frentes del sur (S). Las olas que arriban a la ciudad de Manta son conocidas como mar de leva (swell) y están caracterizadas por tener periodos prolongados por encima de 12 s (Consulsua,

2017). En estudios presentados para Jaramijó-Manta en las dos estaciones del año, muestran que el periodo varía en un rango de 17-22 s con una altura significativa máxima de 2.33 m. En el segundo semestre del año, se presentan olas con periodos prolongados con periodos por encima de 30 s, esto se concluye de las mediciones realizadas por el INOCAR y presentadas por (Allauca & Cardin, 1987).

Las olas rompientes tienen una altura significativa aproximadamente de 0.60 m con gran movimiento de sedimentos por lo tanto es considerada una zona vulnerable a procesos de erosión o sedimentación (Vera, Lucero, & Mindiola, 2009). En los últimos años, se han presenciado oleajes fuertes debido a los vientos en la zona del Pacífico Sur. Estas olas presentaron un rango de altura media de 2-3 m (González, 2018).

Durante El Niño 1982-1983, se observó un incremento en las alturas y energía de las olas (Allauca & Cardin, 1987), por otra parte, Vera (2000), indica que las alturas y periodos en el año 1998, corresponden a olas provocadas por tormentas en el Pacífico Norte, siendo esta dirección poco común en la costa del Ecuador, puesto que la dirección de olas generalmente provienen del suroeste (SW) durante todo el año, a excepción cuando se producen eventos ENSO, en el cual se observan distintas direcciones de olas y esto puede ser debido a condiciones de clima no usuales y presencia de tormentas en el Pacífico Oriental (Berrones, Chunga, Lucero, Ordoñez, & Quinde, 2014).

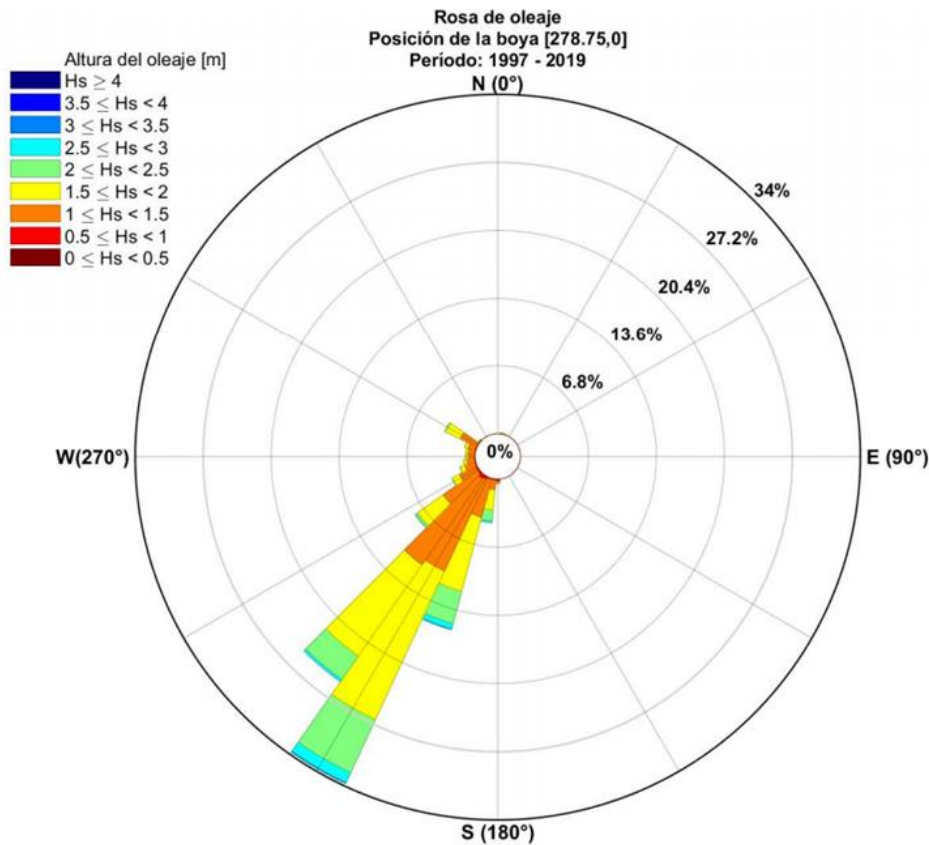


Figura 1.4 Dirección y velocidad de oleaje (Autoras, 2021)

El estudio de Vera L. S. (2000), mostró como resultados que los valores máximos de altura ocurrieron en febrero de 1997 con 1.32 m y febrero de 1998 con 1.54 m. Por otra parte, el periodo máximo de 23 s fue registrado en los meses de febrero, septiembre y octubre. A diferencia de 1998 que se presentaron en enero, febrero y marzo.

1.4.5 Mareas

Se denomina mareas al ascenso y descenso del agua del mar, esto es provocado por la atracción gravitatoria del sol y la luna. Cuando el agua del mar sube a su punto máximo se lo conoce como pleamar, cuando desciende y llega a su punto mínimo se lo conoce como bajamar. Las mareas en la costa ecuatoriana son semidiurnas, esto indica que se presentan 2 pleamares y bajamares en aproximadamente 24.5 h (INOCAR). En la carta náutica IOA 10401 realizada por el INOCAR, indica los niveles de mareas referidos al datum del sondeo en Manta como se muestra en la Tabla 1.1, en el que las amplitudes pueden variar entre 2.65 m en sicigia y 2.1 m en cuadratura.

Tabla 1.1 Niveles de marea en Manta (INOCAR, 2021)

Lugar	Alturas en metros sobre el datum			
	Pleamar Promedio		Bajamar promedio	
	MHWS	MHWN	MLWN	MLWS
Manta	2.65 m	2.1 m	0.27 m	0 m

1.4.6 Variabilidad y cambio climático

De acuerdo con un estudio de Contreras (2014), evidenció que para el 2050 y 2100 se tendrá un incremento de altura significativa del oleaje de 0.53 m y 1.26 m. Además, para el nivel medio del mar se registró que para 2050 y 2100 presentará un incremento de 0.04 m y 0.095 m. Para el caso de la velocidad del viento, en Ecuador las tendencias resultarán negativas, esto quiere decir que se producirá una disminución o se mantendrá estable. En cuanto a la dirección del viento, los vientos con procedencia del norte tienen tendencias positivas (tendencia de giro hacia el Este) en la costa del Pacífico, los vientos del oeste están experimentando modificaciones de giro hacia el Norte y los vientos del sur presentaran tendencias suaves (CEPAL; Universidad de Cantabria; Ministerio de Ambiente y Medio Rural y Marino; Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación, 2011).

1.4.7 Sedimentología

- Según la distribución por textura

La arena es el sedimento que predominó dentro del área comprendida frente a la playa del Murciélago y al lado oeste y norte del rompeolas de la APM y TPM (Soledispa, 2009).

- Según el diámetro medio

En el lado este del espigón predominó las arenas de grano muy finas, al noroeste del rompeolas predominó arenas finas y dentro de los muelles internacionales hasta los muelles de cabotaje de APM predominó limos de grano grueso (Soledispa, 2009).

- Según el grado de clasificación

Al este del espigón y dentro de los muelles internacionales obtuvo arenas mal clasificadas y al noroeste del rompeolas obtuvo arenas bien clasificadas (Soledispa, 2009).

1.5 Marco teórico

1.5.1 Teoría de ondas marinas

1.5.1.1 Teoría lineal de onda

La teoría lineal de las ondas es también denominada teoría de Airy debido a que fue desarrollada por el matemático George Biddell Airy. Esta teoría describe la generación y propagación de las ondas de pequeña amplitud que se forman en aguas profundas y viajan hasta aguas someras. Se basa en una ecuación de continuidad, derivada a partir de la ecuación de balance de masa:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1.1)$$

y de la ecuación de balance de momento en sus tres ejes espaciales (Holthuijsen, 2007).

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g \quad (1.4)$$

Para hacer uso de esta teoría se deben cumplir las siguientes suposiciones (Shore Protection Manual, 1984):

- Las ondas son bidimensionales.
- La amplitud de la onda es pequeña en comparación con la longitud de onda y la profundidad del fondo.

- El flujo es irrotacional.
- La densidad del agua y la presión en la superficie del mar son constantes.
- Los efectos de tensión superficial, viscosidad y Coriolis son despreciables.
- El fondo marino es fijo, profundo e impermeable.

1.5.1.2 Teorías no lineales de onda

Las teorías no lineales de onda describen la transformación del oleaje producido en la superficie del mar cuando las olas entran a aguas intermedias y someras. Estas teorías estudian ondas de amplitud finita que dan lugar a fenómenos ondulatorios dominados por interacciones no lineales en profundidades reducidas, donde las hipótesis de la teoría lineal ya no son válidas. Estos fenómenos son: refracción, difracción, reflexión y rompiente; los cuales pueden interactuar de manera individual o en conjunto (Shore Protection Manual, 1984). El comportamiento de esta onda puede describirse acorde las siguientes 3 teorías principales no lineales:

1.5.1.2.1 Teoría de Stokes

Teoría aplicable a olas de amplitud finita a todas las profundidades y aporta con buen detalle los movimientos de las olas. Toma en cuenta los procesos que sufren las olas en las proximidades de la costa, donde dominan las interacciones no lineales (Guisado, Malvarez, & Navas, 2010). En comparación con la teoría lineal, las ondas presentan crestas más pronunciadas y estrechas, así como también depresiones más someras y anchas (Shore Protection Manual, 1984).

1.5.1.2.2 Teoría Cnoidal

Teoría aplicable a olas de crestas empinadas distanciadas por grandes valles, característico de aguas someras, tomando en cuenta tanto los efectos dispersivos como los no lineales (Guisado, Malvarez, & Navas, 2010). Proporciona una predicción bastante confiable de la forma de onda y los movimientos asociados para algunas condiciones (Shore Protection Manual, 1984).

$$\rho = \rho_r (\rho_r, \theta_r, S_r) + \rho_d (\rho_d, \theta_d, S_d) \quad (1.5)$$

Donde θ_r y S_r , son valores constantes en el estado de referencia de temperatura y salinidad respectivamente, y

$$\frac{\delta P_r}{\delta z} = -\rho_r g \quad (1.6)$$

ρ_d , θ_d y S_d son desviaciones de presión, temperatura y salinidad inducidas por el forzante y el movimiento del fluido.

1.5.1.2.3 Teoría de la onda solitaria

Teoría basada en una ola con desplazamiento completamente sobre el nivel de aguas tranquilas. Se caracteriza por ser una onda que no presenta depresión ni es oscilatoria, sino de translación (Shore Protection Manual, 1984). Este tipo de ondas largas se asocian a maremotos o deslizamientos (Guisado, Malvarez, & Navas, 2010)

1.5.2 Generación del oleaje

1.5.2.1 Mar de viento (sea)

Es el oleaje local debido a la acción del viento generador en un determinado punto del océano. Las olas que se originan en la zona de generación son irregulares, desordenadas, de cresta corta, con poca correlación entre alturas y periodos sucesivos y con varias direcciones de propagación alrededor de la dirección del viento generador (Holthuijsen, 2007).

1.5.2.2 Mar de fondo (swell)

Es el oleaje que se forma una vez generado las olas por el viento local. Este oleaje abandona la zona de generación y se propaga al perfil costero produciendo trenes de ondas de apariencia regular, ordenado, de cresta larga y con alturas, periodos y direcciones constantes (Holthuijsen, 2007).

1.5.3 Transformación del oleaje

1.5.3.1 Asomeramiento

El asomeramiento es un fenómeno físico ondulatorio definido como el proceso de transformación de la onda que se produce cuando las olas de alta mar se aproximan al perfil costero y la profundidad de estas disminuye, así como su velocidad de propagación y longitud de onda, provocando un aumento en la altura de la ola hasta que esta rompe (Shore Protection Manual, 1984).

1.5.3.2 Refracción

El fenómeno físico ondulatorio de refracción se lo define como el cambio de dirección del tren de onda cuando este viaja de aguas profundas a someras. La reducción en la profundidad provoca una disminución en la velocidad de propagación y longitud de onda, mientras que la orientación de la ola se coloca en forma paralela a las isóbatas (Shore Protection Manual, 1984).

La refracción influye de manera significativa en la altura y distribución de energía de las olas a lo largo del litoral debido a que, junto con el asomeramiento, determinan la altura de estas en cualquier profundidad de agua particular bajo un conjunto dado de condiciones de olas incidentes en aguas profundas (Shore Protection Manual, 1984).

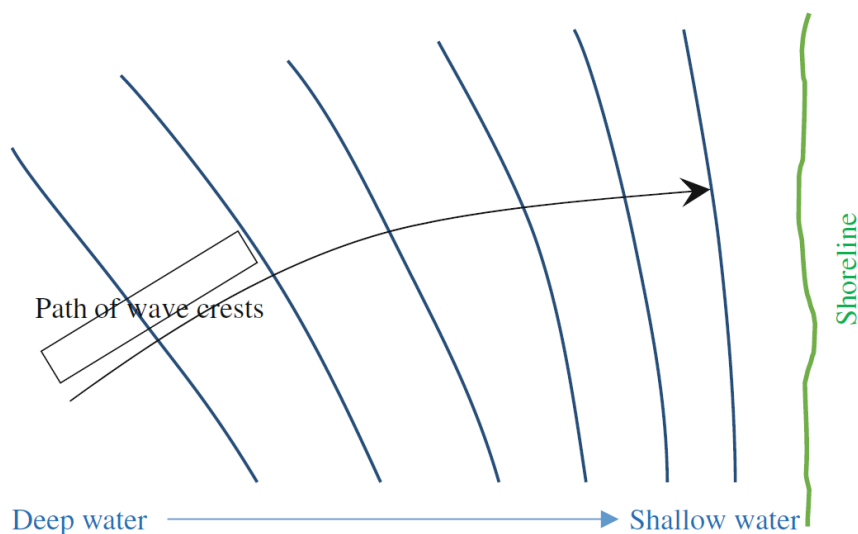


Figura 1.5 Refracción de las olas cerca de la costa debido a un cambio en la profundidad del agua (Pecher & Kofoed, 2017)

1.5.4 Perturbación de olas en puertos

1.5.4.1 Difracción

La difracción se la define como “el fenómeno que le ocurre a una onda al verse afectada por una estructura (espigón, rompeolas, dique, entre otras) a medida que se aproxima a la costa. La presencia de la estructura genera una curvatura de onda hacia la zona interior. El cambio de orientación de las crestas de olas se da por la transferencia de energía lateral entre las crestas de las ondas debido a que la altura de ciertas olas es mayor que las adyacentes” (Sañudo, 2016).

Cuando ocurre la difracción se pueden distinguir dos tipos de áreas: la primera es el área iluminada o expuesta y el área protegida o sombra; en el cual la altura de ola es menor debido a la transferencia de energía (Sañudo, 2016).

Por otra parte, el Shore Protection Manual (1984) menciona que para el desarrollo de las teorías de difracción se hacen las siguientes suposiciones tales como:

- El agua es un fluido ideal, no viscoso e incompresible.
- Las ondas son de pequeña amplitud y pueden describirse mediante la teoría de ondas lineales.
- El flujo es irrotacional y se ajusta a la función potencial, que satisface a la función de Laplace.
- La profundidad hacia la orilla del rompeolas es constante.

El coeficiente de difracción esta dado por la siguiente ecuación:

$$K' = \frac{H}{H_i} \quad (1.7)$$

Donde:

K' = coeficiente de difracción

H = altura de ola en el área afectada por la difracción

H_i = altura de ola en el área no afectada por la difracción

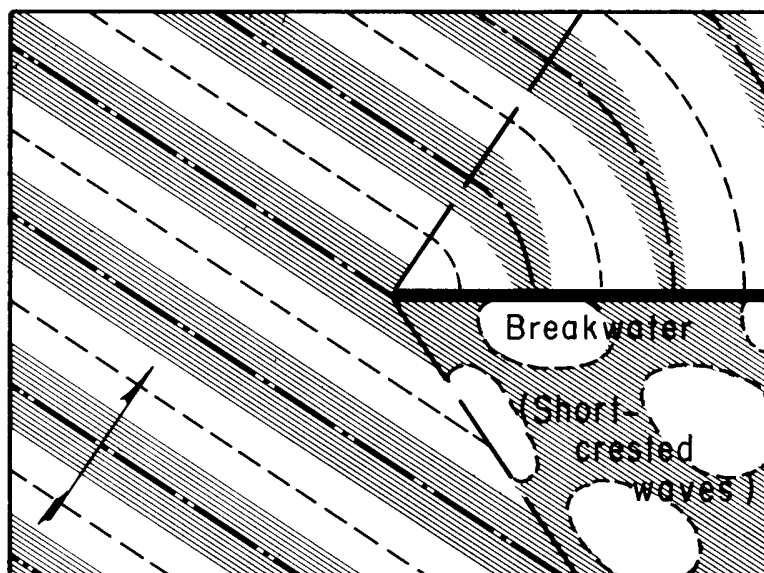


Figura 1.6 Efecto de difracción de olas (Shore Protection Manual, 1984)

1.5.4.2 Reflexión

De acuerdo con el Shore Protection Manual (1984), las ondas pueden reflejarse parcial o totalmente sobre estructuras marítimas naturales o artificiales. La superposición de la ola incidente y la reflejada da como resultado una onda estacionaria o parcialmente estacionaria frente a la estructura, en donde la altura de ola total de dicha onda es equivalente a la suma de la ola incidente y reflejada (Flores, 2008). La reflexión del oleaje depende tanto de las características del oleaje como las de la estructura reflejante (geometría y porosidad) y se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (1.8)$$

Donde:

C_r = coeficiente de reflexión

H_r = altura de ola significativa del oleaje reflejado

H_i = altura de ola significativa del oleaje incidente

La reflexión es una consideración fundamental para el diseño de obras costeras, pero más aun puertos, ya que implica un reflejo de energía de las olas, lo que puede resultar en acumulación de energía que resulta en agitación o turbulencias de ondas en el puerto. Este movimiento constante de olas puede provocar que

las embarcaciones atracadas o instalaciones flotantes presenten tensiones en sus líneas de amarre (Coastal Engineering Research Center, 1984).

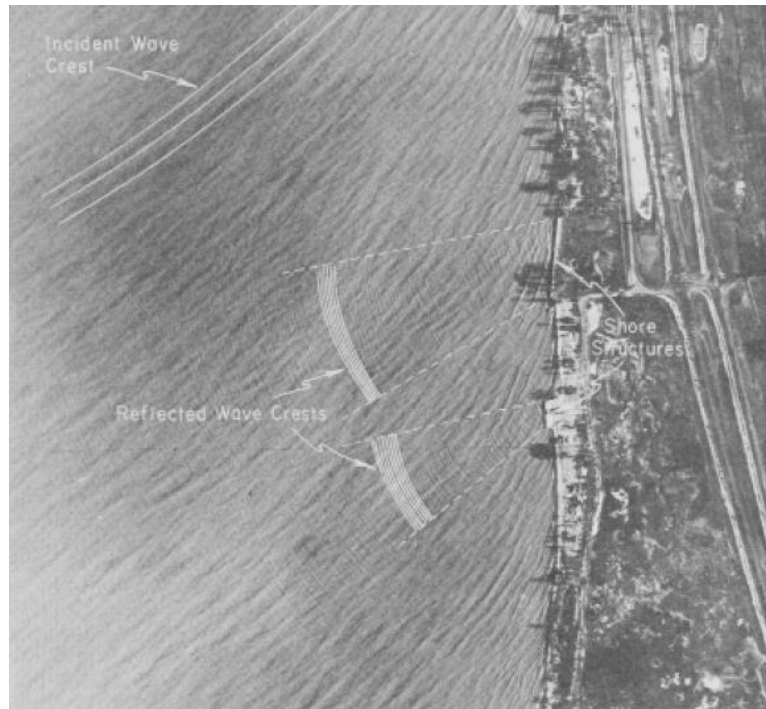


Figura 1.7 Efecto de reflexión de olas en Hamlin Beach, New York (Shore Protection Manual, 1984)

1.5.4.3 Resonancia

Según Fontirroig (2004), la resonancia portuaria es un fenómeno de oscilación en el cual la amplitud de una onda estacionaria o casi-estacionaria aumenta. El fenómeno se debe elementalmente a la simultaneidad entre las frecuencias de fluctuación naturales del cuerpo de agua y las frecuencias de fluctuación de las ondas externas del océano que se extienden e incurren hacia el puerto, interviniendo éstas como elemento forzador (Diaz, 2006).

1.5.4.4 Ondas internas

Acorde con Chiriguaya (1989), las ondas internas son desplazamientos de ondas en cuerpos de agua de estratificación estable, en los cuales la amplitud máxima del movimiento vertical tiene espacio en la zona por debajo de la superficie del fluido.

1.5.4.5 Ondas infragravitatorias

Acorde con Diaz (2006), las ondas infragravitatorias también se las denomina oscilaciones de largo periodo, el cual está comprendido entre los 30-300 s. Este tipo de ondas acumulan gran parte de energía, siendo las principales causantes de la resonancia portuaria. Estas ondas son relevantes en el transporte transversal de partículas.

1.5.5 Estructuras de protección en puertos

1.5.5.1 Espigón

Los espigones son obras de protección costera que se configura perpendicularmente a la línea de playa. Su función principal radica en desviar líneas de corriente de alta velocidad de las orillas, dando lugar a la detención del transporte litoral y retardo en la erosión, lo que permite la formación y conservación de las playas (García, 2018).

1.5.5.2 Rompeolas

Los rompeolas son obras de protección costera que tiene la función de que la energía de la ola incidente provoca que la ola rompa en su talud, ocasionando solo una reflexión parcial. Esta infraestructura marítima es utilizada para disipar la energía de las olas en puertos, fondeaderos, etc., reduciendo así el accionar de las olas en el área protegida (Coastal Engineering Research Center, 1984).

1.5.6 Modelos numéricos computacionales hidrodinámicos

1.5.6.1 Modelos que promedian la fase

Son modelos que se basan de la ecuación del balance de energía (ver ecuación 1.9); es decir que, la energía se conserva. Se utilizan para realizar la transformación de olas de aguas profundas hacia aguas intermedias para áreas de estudio extensas y con una resolución mayor mediante un espectro de energía, lo cual da como resultado la altura significativa (H_{m0}), período pico (T) y dirección media de ola (MWD). Los fenómenos físicos que se pueden encontrar en estos modelos son: asomeramiento, refracción y disipación (Winckler, 2017).

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) + S_{diss}(\sigma, \theta) \quad (1.9)$$

Siendo cada término:

$S_{in}(\sigma, \theta)$ = Términos de forzantes por el viento

$S_{nl}(\sigma, \theta)$ = Términos de interacciones no lineales

$S_{diss}(\sigma, \theta)$ = Términos de disipación

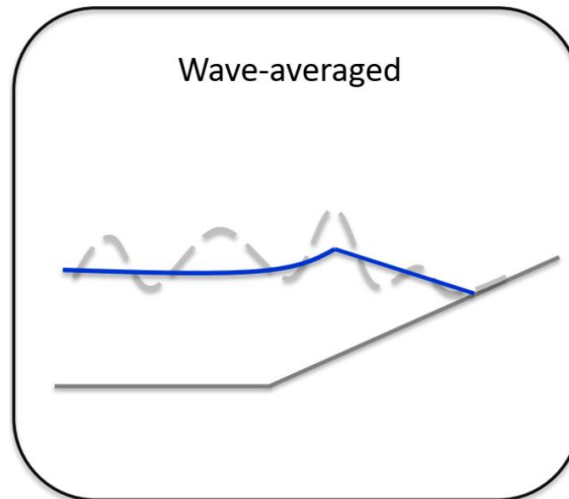


Figura 1.8 Modelos de promedian la fase (Deltares, 2018)

1.5.6.1.1 MIKE 21 Spectral Wave

El Spectral Wave es un modelo de onda de viento espectral. Este módulo simula la transformación y el tamaño de las olas generadas por el viento y el oleaje en áreas costeras y mar adentro. Ofrece un enfoque de malla flexible y una paralelización altamente eficiente. Es capaz de resolver adecuadamente el ambiente físico y dominar los procesos de las olas, al calcular los climas de olas a escala local y regional cuando se requiere una alta resolución espacial. También tiene la facultad de reducir la escala o transformar un clima de olas en alta mar en un procedimiento espectral dinámico (espectro de olas 2D) o haciendo uso de un método de parametrizado rápido (espectro direccional) (MIKE Powered by DHI, 2021). Permite caracterizar fenómenos físicos como:

- Crecimiento de olas por acción del viento
- Interacción onda-onda no lineal
- Disipación debido a la cobertura blanca

- Disipación por fricción del fondo
- Disipación debido a la rotura de olas inducida por la profundidad
- Refracción y asomeramiento por variaciones de profundidad
- Interacción onda-corriente
- Efecto de la profundidad del agua que varía con el tiempo y la inundación y el secado

1.5.6.2 Modelos que resuelven la fase

Son modelos que se basan en la ecuación de la conservación de la masa y el momento; es decir que, permite caracterizar la evolución en el tiempo y espacio de las ondas individuales. Es posible representar fenómenos de asomeramiento, refracción, difracción, reflexión y disipación. Es aplicable para zonas portuarias, bahías, etc., en donde se puede presentar agitación de ondas de periodos cortos (3-30 s) y también fenómenos asociados a la resonancia cuyos periodos son mayores (30-100 s). Estos modelos están limitados a estudios de áreas pequeñas. Dentro de las teorías de ondas que resuelven la fase tenemos la Teoría de Stokes y de Onda Larga (Boussinesq) (Winckler, 2017).

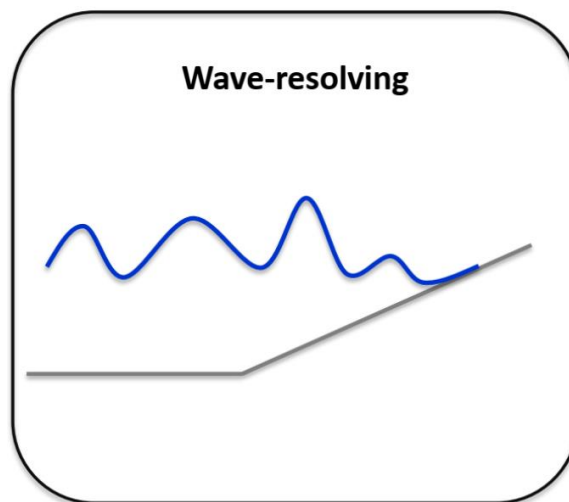


Figura 1.9 Modelos que resuelven la fase (Deltares, 2018)

1.5.6.2.1 MIKE 21 Boussinesq Wave

El módulo Boussinesq Wave es adecuado para la modelación eficiente de perturbación de olas en puertos, bahías y áreas costeras, lo cual es importante para el diseño de estos. Es capaz de simular condiciones de olas de periodos cortos y largos. Es posible evaluar la dinámica de las olas dentro de los puertos

y las cuencas portuarias reproduciendo los efectos combinados de los fenómenos de las olas (MIKE Powered by DHI, 2021). La Figura 1.10 ilustra los procesos costeros desde la condición de aguas profundas a la costa.

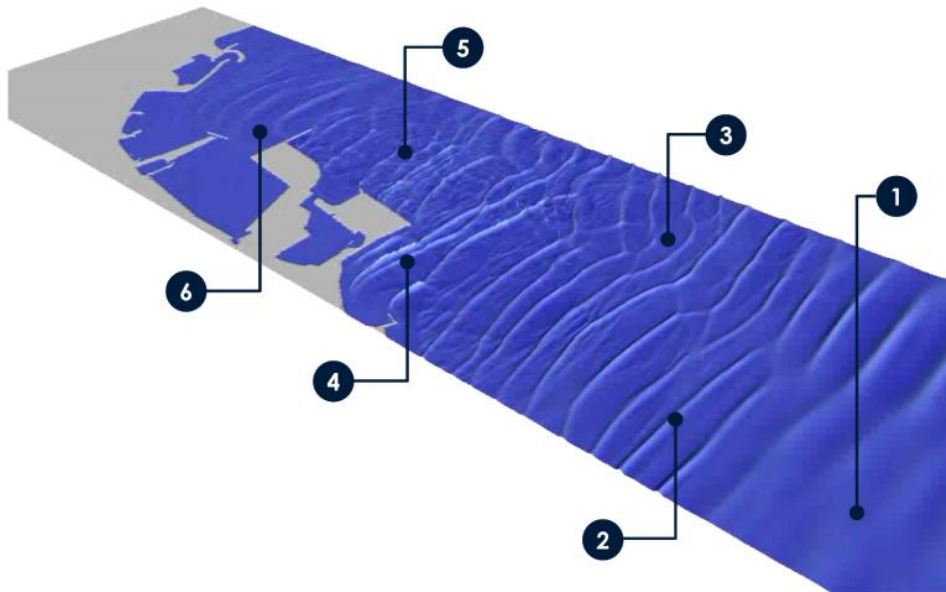


Figura 1.10 Procesos costeros desde la condición de aguas profundas a la costa

Donde:

1. Un oleaje no regular en aguas profundas empieza a ser afectado por la superficie del fondo.
2. A causa del acortamiento en la profundidad, las ondas tienden a probar asomeramiento y se vuelven asimétricas, con valles más largos y crestas de alta pendiente.
3. Dado a la desigualdad de la batimetría, en áreas bajas la onda disminuye la velocidad consecuencia de la refracción.
4. Cerca de las estructuras costeras se produce reflexión y el patrón resultante de oleaje es cuasi-estacionario, con amplitudes más altas al incidente. Eventualmente ocurre la rotura de ola.
5. Resultado de la reflexión en las estructuras costeras y la propagación no-lineal de ondas, se muestran patrones de oleaje complejos y oscilaciones de mayor frecuencia.
6. Producto de la difracción, los frentes se ondulan significativamente, se reduce la amplitud y se obtiene una dársena resguardada.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Este capítulo describe la metodología desarrollada para este estudio, la misma que se dividió en 6 etapas. La Figura 2.1 muestra el proceso desde la recolección de información, en donde se tienen referencias bibliográficas, datos del WW III y la batimetría. Pasando a la etapa 2, en donde se crearon los archivos de entrada como la batimetría, la malla, se generaron las series de tiempo para viento y oleaje, y con la caja de herramientas se elaboró la capa de esponja, de porosidad y la onda interna. En la etapa 3 ocurre la simulación con el módulo SW en aguas profundas, el cual se encarga de la transformación de olas generadas por el viento. Los archivos de salida de esta etapa son fundamentales para la simulación en aguas someras a través del módulo BW en la etapa 4. Posterior a esto, en la etapa 5 se realiza la calibración y validación de cada uno de los modelos recreando el evento ENSO 1997-1998. Finalmente, en la etapa 6 se generaron posibles escenarios tomando en cuenta las condiciones ENSO 1997-1998, cambio climático con proyecciones 2050 y 2100, modificaciones del rompeolas y oleaje incidente en las direcciones de 330°, 360°, 15°, 30° y 60°.

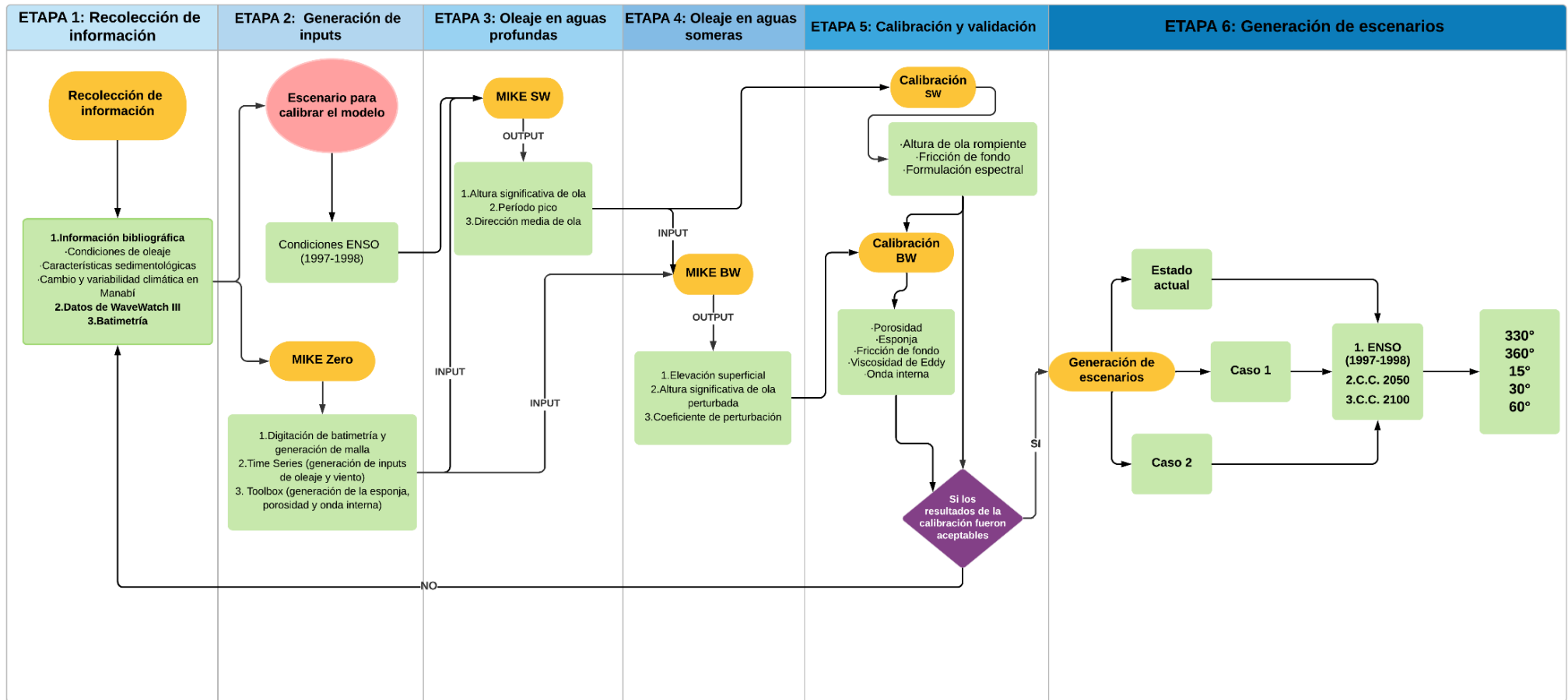


Figura 2.1 Metodología implementada (Autoras, 2021)

2.1 ETAPA 1: Recolección de información

2.1.1 Datos del WAVEWATCH III

El pronóstico de oleaje se lo obtuvo a partir del WW III con ayuda de una rutina de MATLAB (Apéndice B) para extraer altura significativa, periodo pico, dirección de ola, velocidad y dirección de viento mostrados en la Tabla 2.1, en un período comprendido 1997-2019 en la boya ubicada a $81^{\circ}23'16.55''\text{O}$ y $0^{\circ} 0'3.73''\text{N}$ (Figura 2.2).

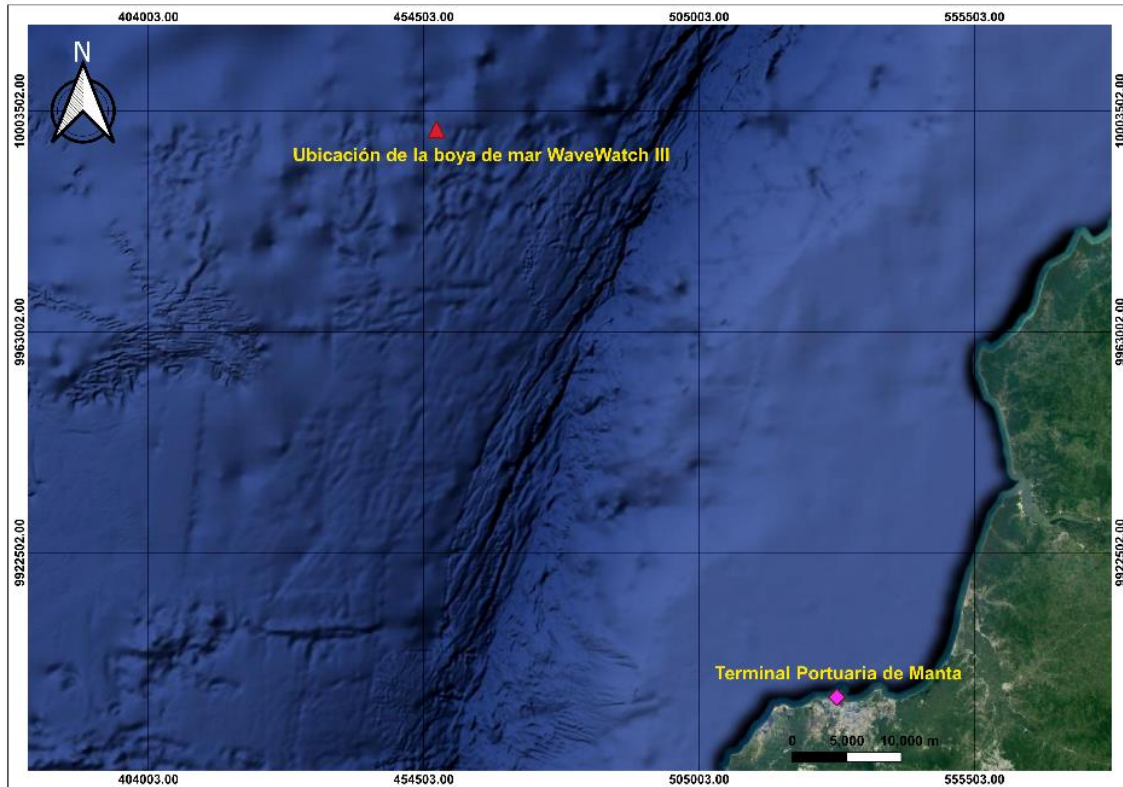


Figura 2.2 Ubicación de la boya de mar del WW III en relación a la TPM (Autoras, 2021)

Tabla 2.1 Rango de valores obtenidos a partir de la estadística de olas (Autoras, 2021)

Variables	Rango
Altura significativa	0.28 - 3.62 [m]
Periodo	2.77-23.41 [s]
Dirección	2.9 - 350.63 [°]
Velocidad de viento	0-11.40 [m/s]
Dirección del viento	0.034-360 [°]

2.1.2 Batimetría

Para realizar la batimetría se utilizó las cartas náuticas IOA 103, IOA 104 e IOA 104010 del INOCAR, las que presentan menor aproximación al área de estudio fueron utilizadas para el modelo SW (IOA 103-IOA 104) y la de mayor aproximación (IOA 104010) para el modelo BW (Apéndice A).

2.2 ETAPA 2: Generación de archivos de entrada en MIKE Zero

2.2.1 Digitalización de batimetría y generación de malla

Para generar la batimetría se procedió a crear un archivo batsf que se encuentra dentro de los archivos de MIKE Zero. Como segundo paso, se definió el área de estudio y se procedió a importar las cartas náuticas para después comenzar a digitalizar la franja de tierra y la batimetría (Figura 2.3). A partir de esto, se exportaron 2 archivos xyz (tierra y agua).

Para la generación de la malla se procedió a crear un archivo mdf en el cual se importó los 2 archivos xyz y las cartas náuticas. Luego, se determinó los arcos que definen las condiciones de borde y se fijó los códigos respectivos para cada arco. Posteriormente, se generó la malla flexible con la interpolación de la batimetría (Figura 2.4). Por otro lado, en el modelo BW no se hace uso de mallas, sino que solo de la batimetría (Figura 2.5), la cual es el resultado de la interpolación de los archivos de extensión xyz.

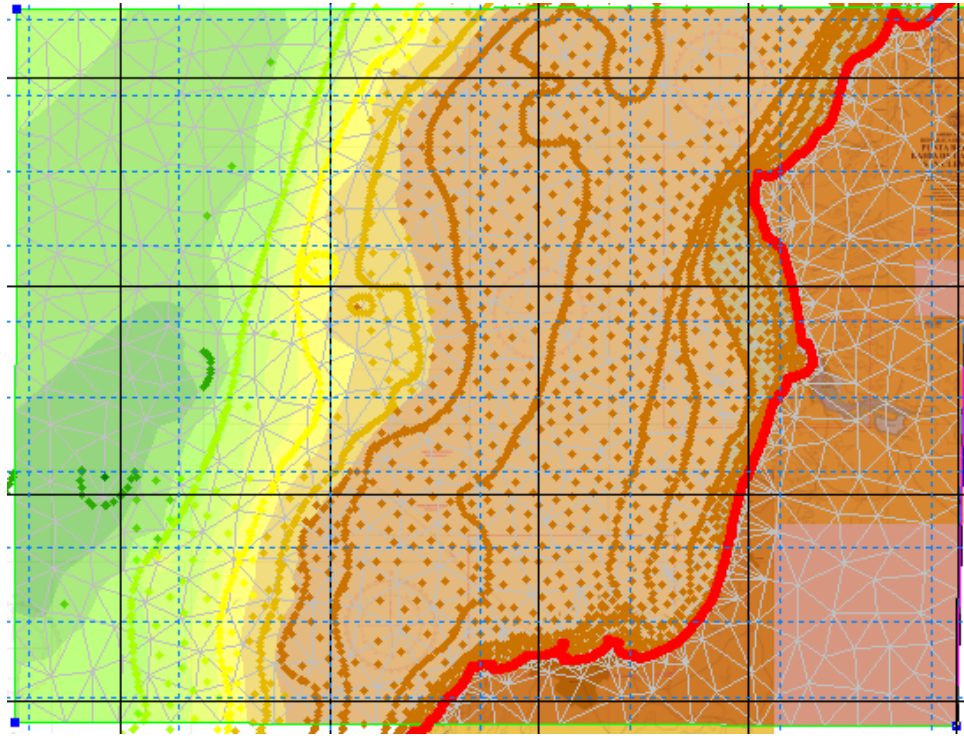


Figura 2.3 Generación de malla e interpolación de la batimetría (Autoras, 2021)

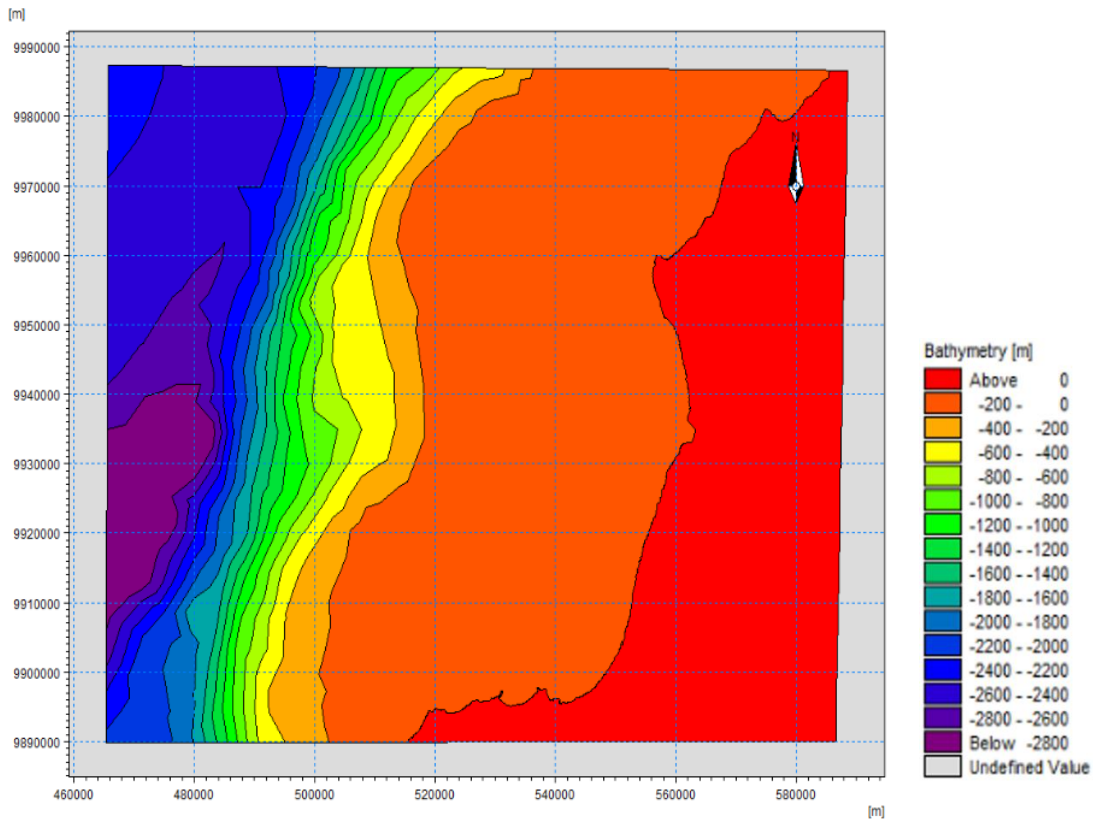


Figura 2.4 Malla para modelo SW (Autoras, 2021)

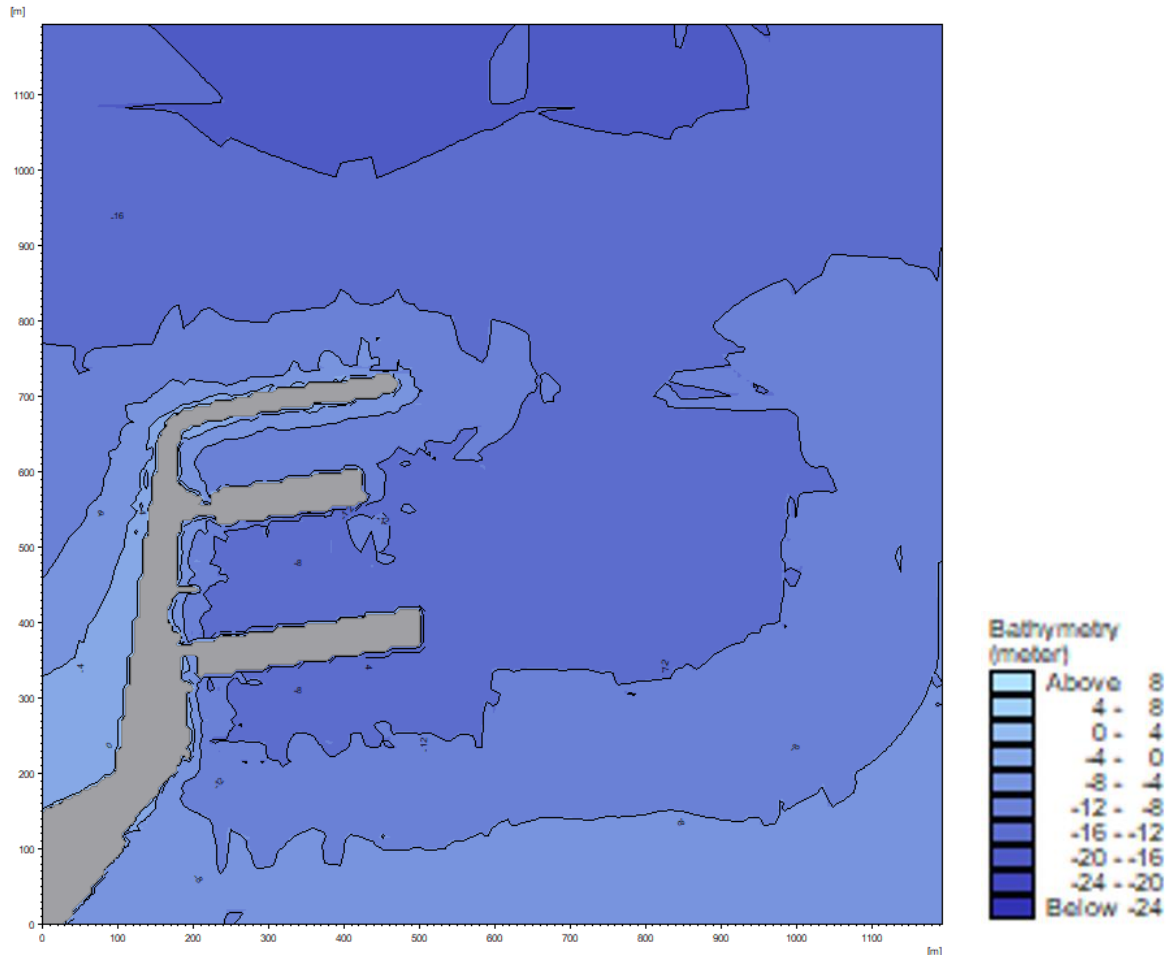


Figura 2.5 Batimetría para modelo BW (Autoras, 2021)

2.2.2 Serie de tiempo

La serie de tiempo es una herramienta que se encuentra en MIKE Zero y sirve para generar los inputs de clima de olas y viento para SW. Para clima de olas se colocó las variables de altura significativa, dirección media de ola, período pico y desviación estándar direccional. Para la variable de viento, se seleccionó la velocidad y dirección. A cada archivo, se le introdujo el tiempo de inicio acorde con su time step. Como resultado, se tienen archivos tipo dfs0.

2.2.3 Caja de herramientas

La caja de herramientas de MIKE 21 permitió generar archivos como la onda interna, capa porosa y capa de esponja, importantes para la simulación en el módulo BW. Se ingresaron parámetros de olas (altura significativa, periodo pico,

profundidad, dirección) tanto para la generación de la onda interna en aguas en transición, como cerca del rompeolas. Como resultado proporciona archivos de extensión dfs0, dfs1 y dfs2.

2.3 ETAPA 3: Oleaje en aguas profundas utilizando MIKE 21 SW

MIKE 21 SW es un módulo que permite realizar la transformación de oleaje de aguas profundas a someras. Para nuestro caso de estudio se escogió un área grande para poder observar el oleaje del norte. El proceso para la obtención de los resultados es el siguiente:

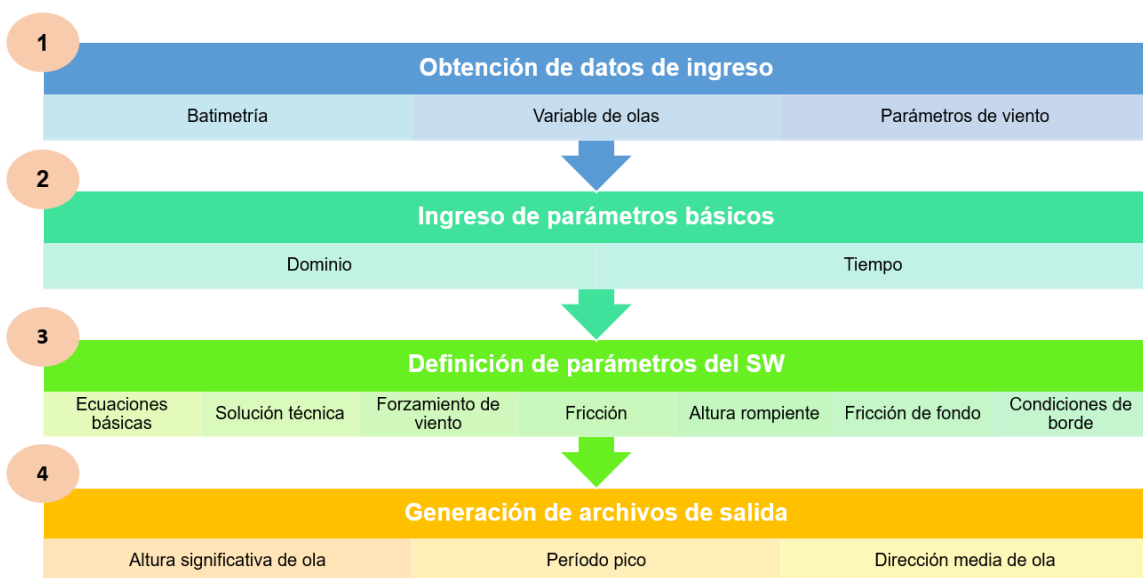


Figura 2.6 Proceso utilizado para la simulación del módulo SW (Autoras, 2021)

2.3.1 Paso 1: Preparar archivos de ingreso

Los archivos de ingreso para esta modelación son los siguientes:

- Batimetría
- Variables de olas
- Parámetros de viento

La batimetría se la realizó en editor de batimetría dentro de la sección de MIKE Zero. Por consiguiente, los parámetros de olas y vientos se utilizó la herramienta de time series en el cual se obtienen archivos con extensión dfs0.

2.3.2 Paso 2: Ingresar parámetros básicos

Se ingresó el archivo de batimetría en el área de estudio y se definió el tiempo de simulación (Figura 2.7).

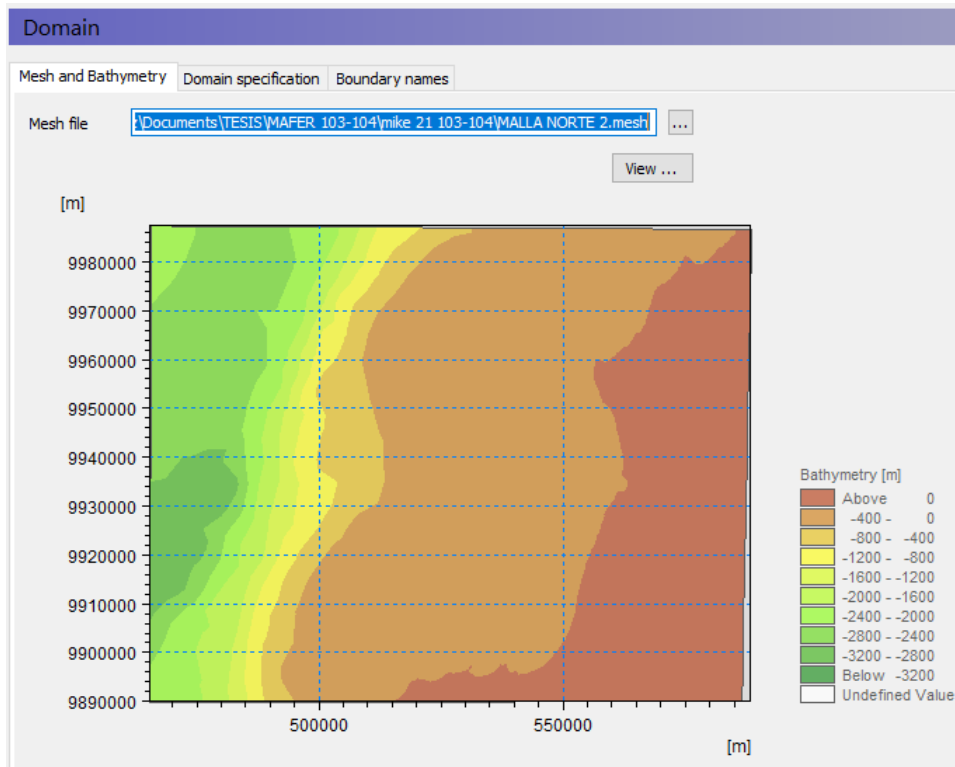


Figura 2.7 Dominio del área de estudio (Autoras, 2021)

2.3.3 Paso 3: Ingresar parámetros del SW

- **Seleccionar las ecuaciones básicas**

El módulo SW ofrece 2 tipos de formulaciones espectrales, para este caso se seleccionó la formulación paramétrica direccionalmente desacoplada con un tiempo espectral cuasi estacionario ya que no se está teniendo en consideración la generación de olas por viento.

- **Establecer la solución técnica**

En la sección de discretización del espacio geográfico, se seleccionó un esquema de orden superior para que sea más preciso el resultado de los datos. Por otra parte, se modificó el valor de tolerancia que depende del tiempo y la capacidad del computador siendo un valor de incertidumbre de 0.01 m.

- **Ingresar forzamiento de viento**

Se generó los archivos de las variables de viento (velocidad y dirección) para los escenarios establecidos en times series, en el cual se estableció que es variable en el tiempo, pero constante en su dominio (Figura 2.8). En la formulación del viento se seleccionó SPM73 ya que, por medio de (Manson, 2012) menciona que esta formulación no genera sobreestimación en los resultados.

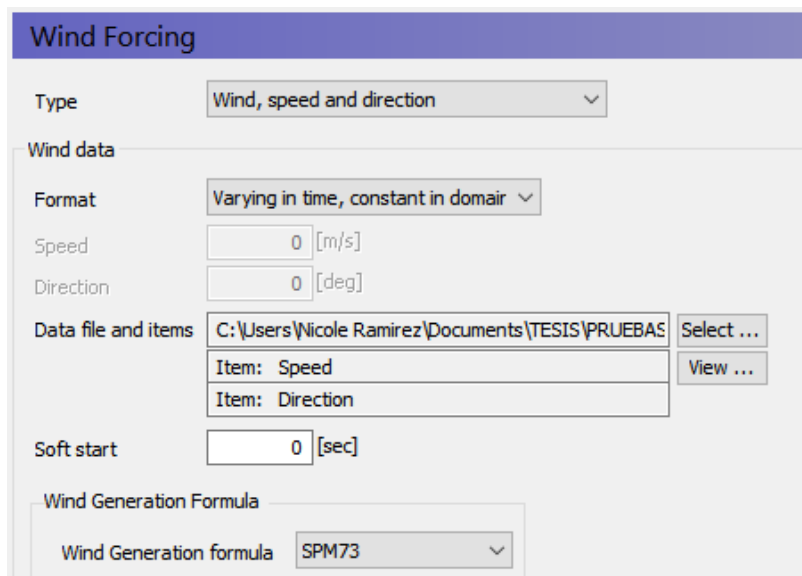


Figura 2.8 Ingreso de archivo de viento (Autoras, 2021)

- **Ingresar difracción**

Se consideró la difracción porque cerca del área de calibración se tienen estructuras costeras y esto genere un ajuste a los resultados.

- **Ingresar altura de ola rompiente y fricción de fondo**

Se ingresó el valor de 0.6 m de ola rompiente puesto que cerca de la costa de Manabí es un valor promedio de altura de ola rompiente. Se ingresó un valor de Nikuradse de 0.03 m.

- **Definir las condiciones de borde**

Se verificó que cada borde tenga su respectivo código y color. Por consiguiente, se colocó la información respectiva de oleaje, en el lado oeste porque es donde viene el oleaje representativo, para los demás

bordes se seleccionó el tipo de límite lateral puesto que no se requiere realizar cambios de direcciones de oleaje (Figuras 2.9-2.10).

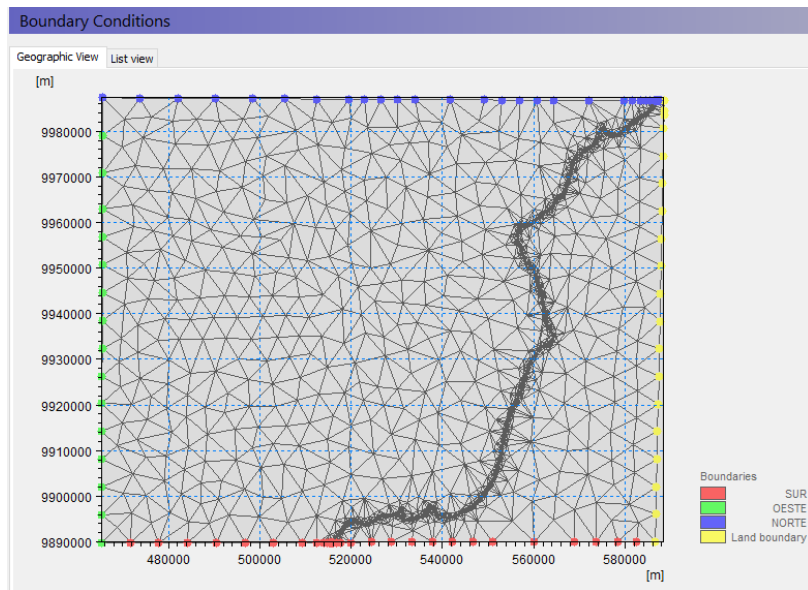


Figura 2.9 Visualización geográfica de las condiciones de borde con los respectivos códigos y colores (Autoras, 2021)

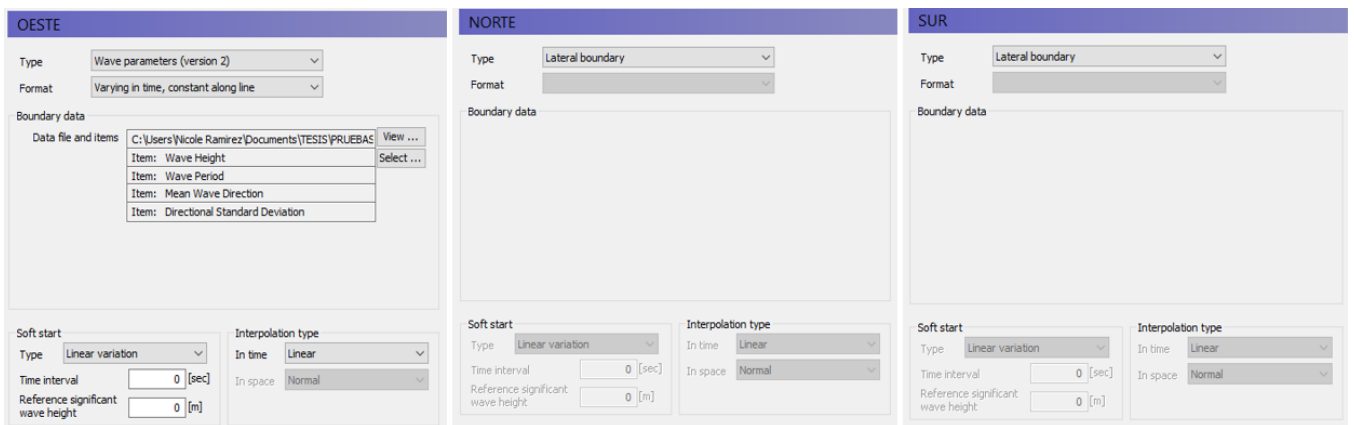


Figura 2.10 Definición del tipo de condición para cada borde (Autoras, 2021)

2.3.4 Paso 4: Generar archivos de salida

El resultado básico de MIKE 21 SW consistió en un archivo con extensión dsfu, el cual contiene datos de altura significativa, período pico y dirección media de ola (Figura 2.11).

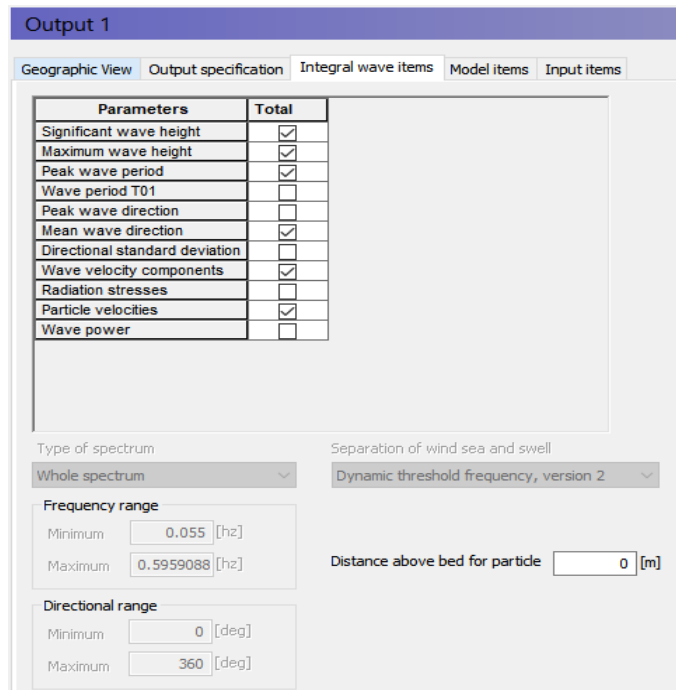


Figura 2.11 Archivos de salida del modelo SW (Autoras, 2021)

2.4 ETAPA 4: Oleaje en aguas someras con MIKE 21 BW

El módulo Boussinesq Wave se utilizó para evaluar la dinámica de las olas dentro de la Terminal Portuaria de Manta reproduciendo los efectos combinados que se dan de la transformación del oleaje desde aguas en transición a someras. El proceso para la obtención de los resultados se muestra en la Figura 2.12.

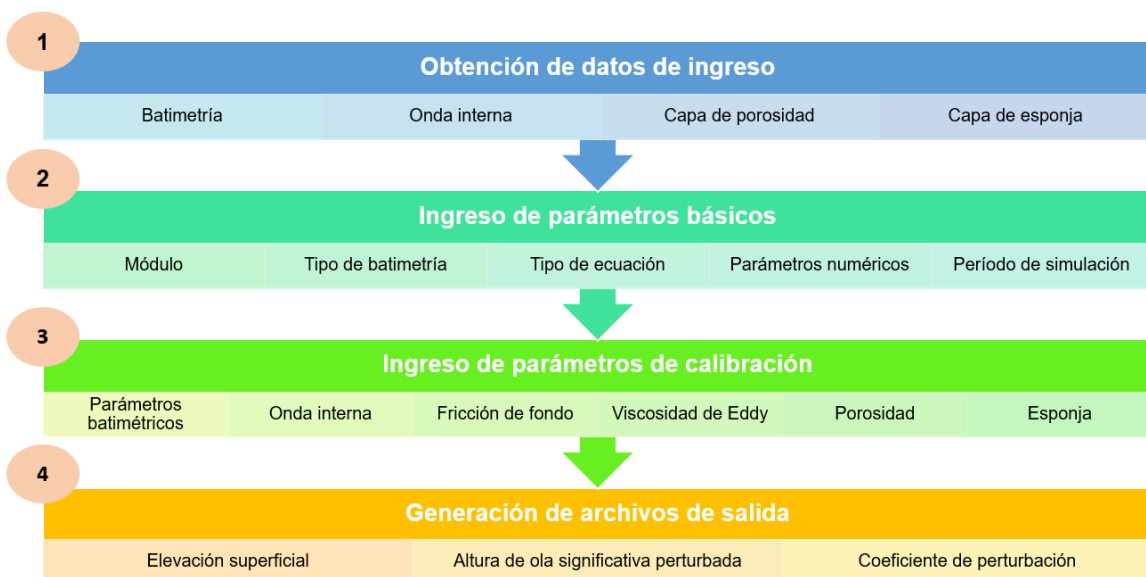


Figura 2.12 Proceso utilizado para la simulación del modelo BW (Autoras, 2021)

2.4.1 Paso 1: Preparar archivos de ingreso

Los archivos de ingreso para esta modelación son los siguientes:

- Batimetría
- Onda Interna
- Capa de porosidad
- Capa de esponja

La batimetría se realizó en el editor de batimetría dentro de la sección de MIKE Zero. La generación de la onda interna, capa porosa y de esponja se llevó a cabo con la caja de herramientas de MIKE 21 por la que se obtuvieron los archivos con extensión dfs1, dfs2 y dfs2 respectivamente.

2.4.2 Paso 2: Ingresar parámetros básicos

- **Seleccionar modulo**

Para el presenta caso de estudio se escogió el módulo de dos coordenadas espaciales horizontales ya que en este es posible calcular la perturbación de las olas en el puerto, así como también es capaz de reproducir efectos ondulatorios como el asomeramiento, refracción, difracción, entre otros.

- **Seleccionar batimetría**

Se escogió la opción “cold start” ya que la simulación comenzará desde cero y a continuación, se seleccionó el archivo con la batimetría.

- **Seleccionar tipo de ecuación**

En este módulo se seleccionó incluir los términos de aguas profundas ya que estas resuelven las ecuaciones mejoradas de tipo Boussinesq. De no incluirlas en el modelo, las interacciones no lineales entre armónicos en aguas someras pueden despreciarse. Según con la guía de uso del módulo BW (MIKE Powered by DHI, 2021) para muchos casos prácticos es recomendable el factor de dispersión lineal mostrado a continuación.

- **Ingresar parámetros numéricos**

El modelo ofrece varias opciones para la discretización espacial de los términos convectivos. Para el presente estudio se utilizó la diferenciación central con alimentación lateral ya que este permite centrar las derivadas del momento cruzado sin disipación numérica (MIKE Powered by DHI, 2021).

- **Ingresar período de simulación**

En este paso se definió el periodo de simulación el cual se determinó desde el 1 de febrero de 1997 a las 00:00:00 , con un numero de tiempo de pasos de 14000 y un intervalo de tiempo de 0.148 s, por lo que el periodo de simulación finalizaría el 1 de febrero de 1997 a las 00:34:32. El número de Courant es una expresión que describe el número de puntos de la cuadrícula por los que viajará la información de ondas en un time step y este siempre debe ser igual o menor que 1 en aplicaciones 2D (MIKE Powered by DHI, 2021).

2.4.3 Paso 3: Ingresar parámetros de calibración

- **Generar onda interna**

En este paso se cargó el archivo con la generación interna de onda, la cual está ubicada delante de la capa de esponja, permitiendo a la esponja absorber las ondas que salen del área del modelo (Figura 2.13).

- **Ingresar fricción de fondo y viscosidad de Eddy**

Acorde con un estudio técnico realizado en el Puerto de Manta, en la zona se determinó una fricción de fondo constante de acuerdo con la formulación del número de Chezy. Para la viscosidad se determinó constante y bajo la formulación del coeficiente de Eddy basado en la velocidad.

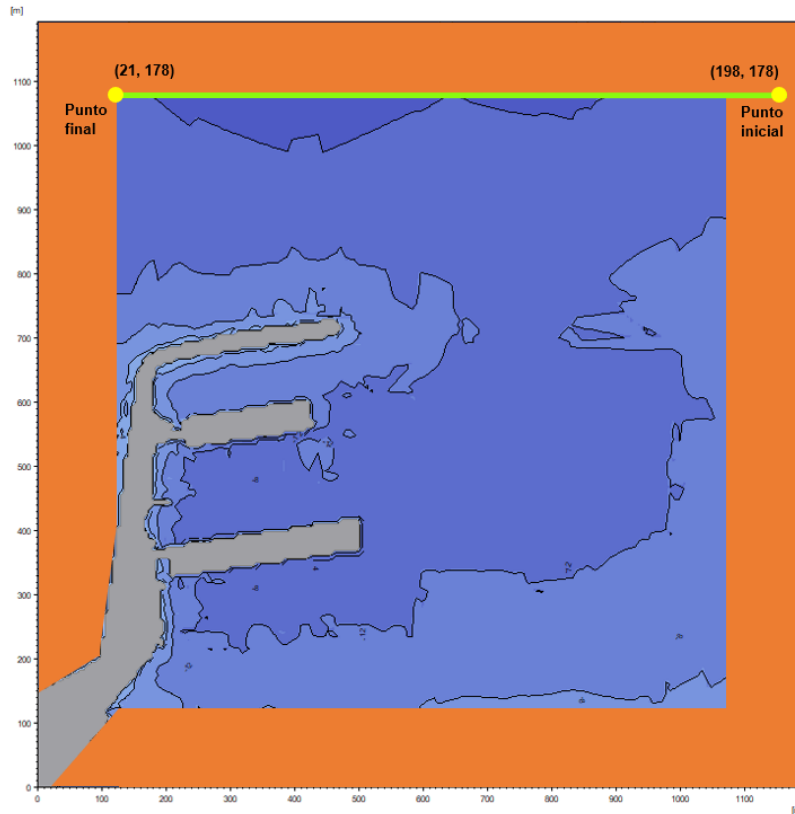


Figura 2.13 Línea de generación de la onda interna (Autoras, 2021)

- **Ingresar capa de porosidad**

En este paso se cargó el archivo con la capa de porosidad la cual se configuró a lo largo de las estructuras con propiedades de reflexión parcial. La porosidad solo debe establecerse en menor a 1 a lo largo de las estructuras donde se desea incluir el efecto de disipación del flujo poroso (MIKE Powered by DHI, 2021). Para este ejercicio se determinó una porosidad de 3 capas (Figura 2.14).

- **Ingresar capa de esponja**

En este paso se cargó el archivo con la capa de esponja la cual se configuró a lo largo de los límites del modelo para proporcionar condiciones de límite de radiación, que absorben la energía de las olas que se propaga fuera del área del modelo (MIKE Powered by DHI, 2021). Para este ejercicio se determinó una esponja de 20 capas (Figura 2.15).

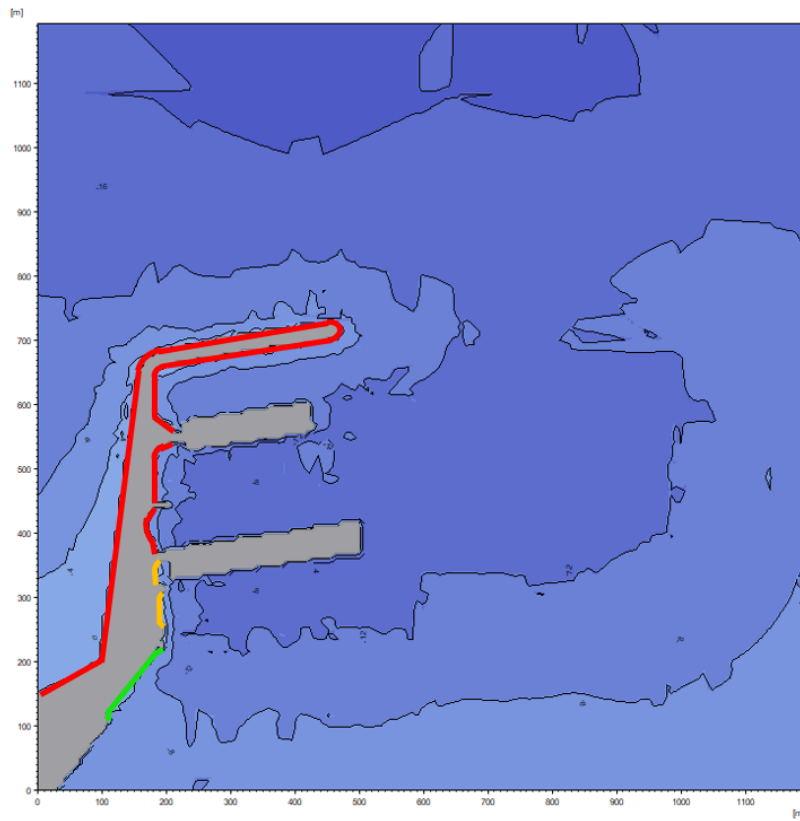


Figura 2.14 Capa de porosidad (Autores, 2021)

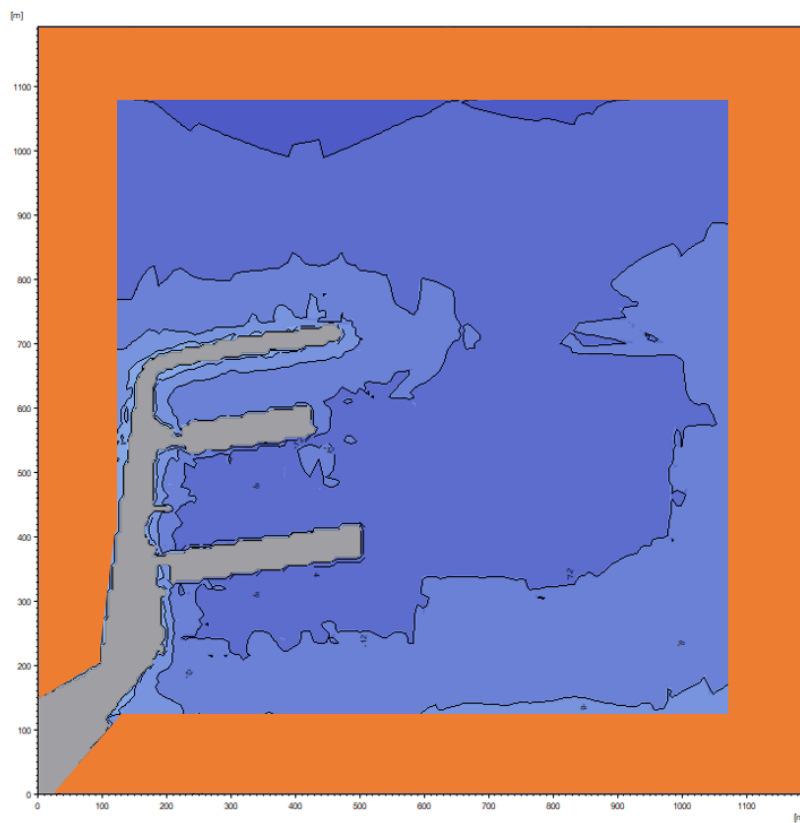


Figura 2.15 Capa de esponja (Autoras, 2021)

2.4.4 Paso 4: Generación de archivos de salida

- **Parámetros determinísticos**

Se definió un archivo de salida de extensión dfs2, en el cual se generó los valores de elevación de la superficie en el área de estudio (Figura 2.16).

- **Parámetros de perturbación de ola**

Se definió un archivo de salida de extensión dfs2, en el cual se generó los valores de altura de ola y coeficiente de perturbación en el área de estudio (Figura 2.16).

The image shows two screenshots of a software interface. The top screenshot is titled "Deterministic Parameters" and includes sections for "Output Files" (Numbers of output Files: 1), "File Output Size" (Total output size: 16.3269 MB, Local output size: 4.73022 MB), and a table with columns: Type, J, K, Time, Data File, Title, Output Items, and View... The bottom screenshot is titled "Wave Disturbance Parameters" and includes sections for "Wave Disturbance Parameters" (radio buttons for Exclude and Include, with Include selected), "Type of Wave Height Scaling" (radio buttons for Relative to wave height in grid point and Relative to incoming wave height, with the latter selected), "Wave Specification" (Grid point coordinates: 320, 380; Incoming wave height (Hm0): 1.1), "Calculation Period" (First time step: 2400, Last time step: 13999, Update interval: 480, Start at arrival of wave no.: 1), "Data Specification" (Data file: C:\Users\mafer\Desktop\+200\360\ENSO9798\Wave1, Data title: Wave disturbance parameters, checkboxes for Sign. wave height, Wave dist coeff., and Wave arrival time), and "File Output Size" (Local output size: 11.5967 MB, Total output size: 16.3269 MB).

Figura 2.16 Archivos de salida del modelo BW (Auras, 2021)

2.5 ETAPA 5: Calibración y Validación de los modelos

Los resultados del modelo SW fueron calibrados y validados tomando en referencia el Acta Oceanográfica del Pacífico producida por el INOCAR titulado

“Régimen del oleaje en la zona de Jaramijó y Salinas”, en donde se analizaron las condiciones del oleaje en Jaramijó (altura significativa y período pico) para el período comprendido de 1997-1998 (Apéndice C).

Por otro lado, los resultados del modelo BW fueron calibrados y validados según la metodología del Shore Protection Manual para determinar la altura de olas en el área afectada por la difracción con el uso de diagramas de difracción. Estos diagramas muestren líneas de igual reducción de la altura de las olas. En la Figura 2.17 se muestra el proceso que se llevó a cabo.

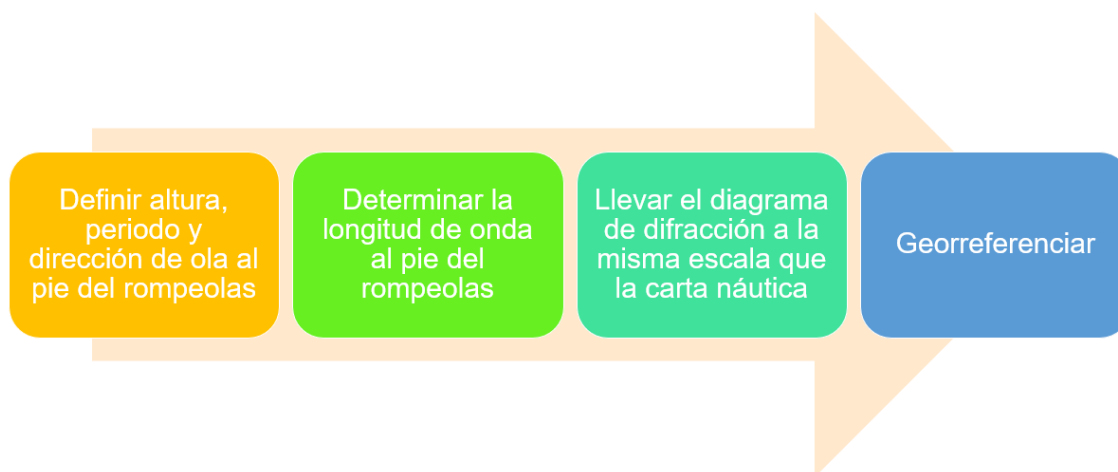


Figura 2.17 Proceso de calibración y validación del modelo BW. (Autoras, 2021)

A partir de los resultados generados en el módulo SW, se escogieron datos de altura, periodo y dirección de ola al pie del rompeolas. Estos datos fueron utilizados para determinar la longitud de onda al pie de la estructura de protección costera. Para hacer uso de los diagramas de difracción es importante que esté a la escala correcta, para esto se determinó la longitud que debe tener cada una de sus unidades de radio-longitud de onda. Como último paso, se georreferenció con el uso de la herramienta de QGIS. En el Apéndice D, se muestra los cálculos realizados.

2.6 ETAPA 6: Generación de escenarios

La disminución de operatividad dentro de la TPM se produce cuando existen fuertes oleajes provenientes del norte combinados con aguaje y otros fenómenos que generan un aumento de la altura significativa dentro de los muelles

internacionales, por lo tanto, los escenarios planteados fueron utilizados para analizar el comportamiento hidrodinámico de la TPM en condiciones extremas ante el estado actual del rompeolas y posteriormente con modificaciones.

2.6.1 Condiciones de oleaje

A partir del modelo SW que realizó la transformación del oleaje de aguas profundas a aguas someras, se seleccionó los parámetros de oleaje cerca del veril 20, límite de la batimetría utilizada para el modelo BW. Las características de oleaje ENSO son $H_s = 1.1$ m y $T = 11$ s. Las condiciones para cambio climático proyección 2050 son $H_s = 2.08$ m y $T = 12$ s y para la proyección 2100 son $H_s = 2.36$ m y $T = 13$ s. Estos eventos fueron probados con ángulos de generación de oleaje desde 330° , 360° , 15° , 30° y 60° .

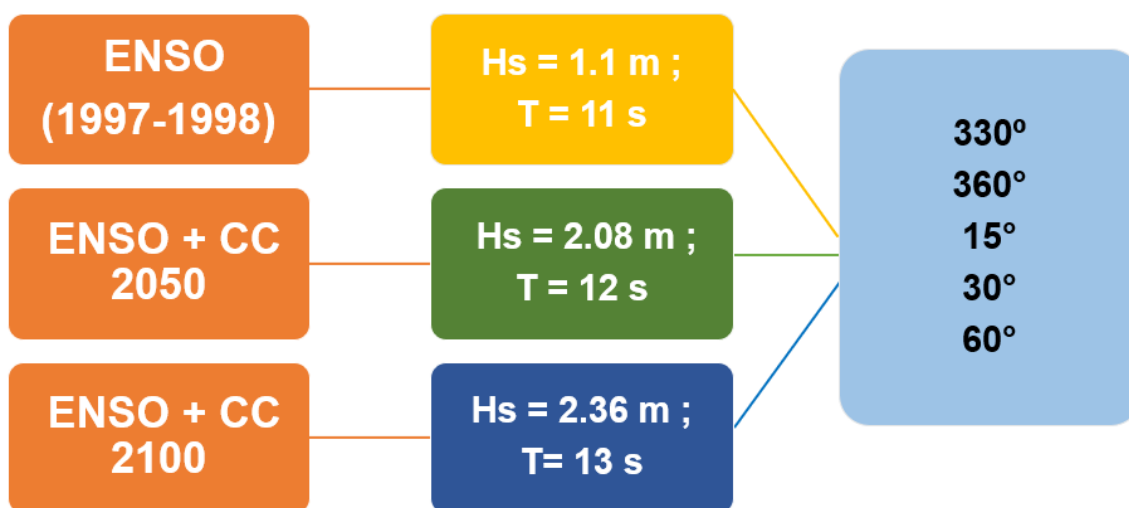


Figura 2.18 Escenarios para la modelación con MIKE 21 BW (Autoras, 2021)

2.6.2 Modificaciones del rompeolas en MIKE 21

Se decidió evaluar los eventos y condiciones previamente mencionados con modificaciones longitudinales de la estructura de protección costera. Las modificaciones al rompeolas fueron realizadas con la herramienta Batimetría de MIKE Zero. En la Figura 2.19 se presenta el Caso 1, el cual consistió en un alargamiento al rompeolas de 200 m. En la Figura 2.20 se presenta el Caso 2, el cual consistió también en un alargamiento 200 m y adicionalmente una extensión

del rompeolas de 100 m. Cabe recalcar que para estas configuraciones se mantuvo el ángulo de inclinación del rompeolas.

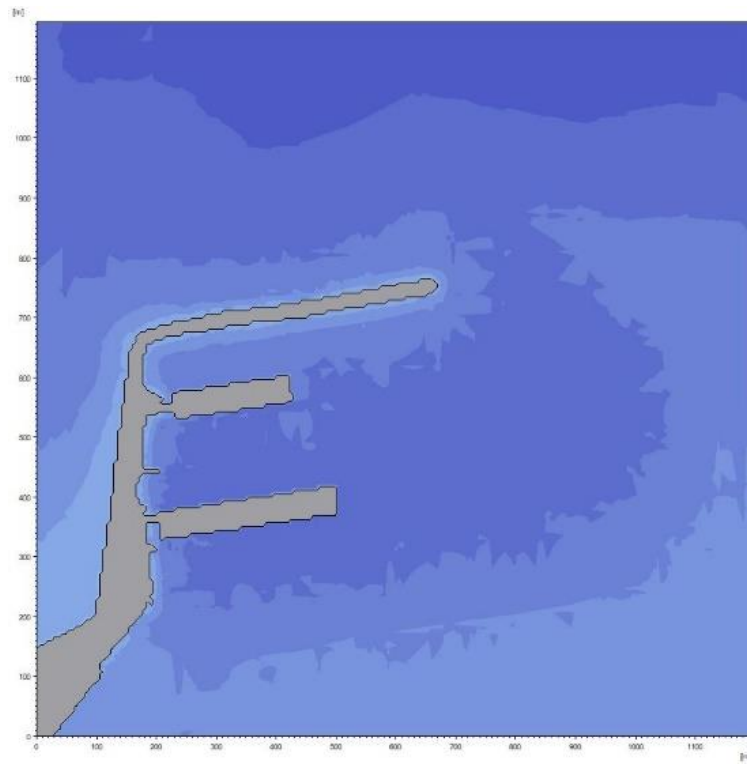


Figura 2.19 Caso 1: Alargamiento de 200 m (Autoras, 2021)

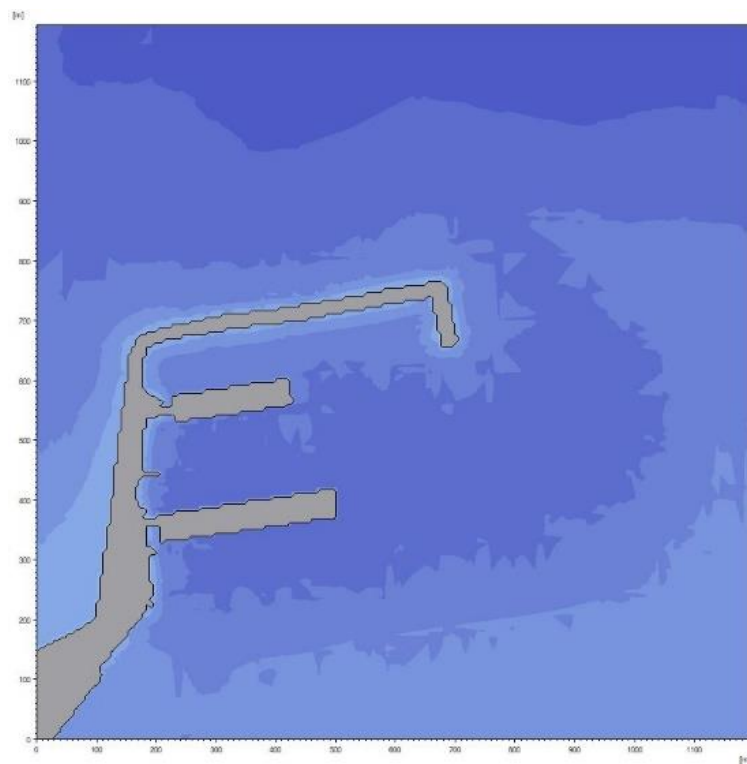


Figura 2.20 Caso 2: Alargamiento de 200 m y extensión de 100 m (Autoras, 2021)

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Resultados de la ETAPA 1

3.1.1 Datos del WAVEWATCH III

De un set de 65256 datos que comprenden entre 1997-2019, las olas de norte representan el 5.65%, siendo 297.13° - 323.88° el intervalo de clase con el mayor porcentaje de ocurrencia. Por otra parte, se evidencia en la Figura 3.1 que se tienen alturas significativas entre 1.6-1.8 m en las direcciones de 290° - 310° y con menor incidencia, se observa alturas significativas de 1.4 a 1.8 m en las direcciones entre 0° - 30° .

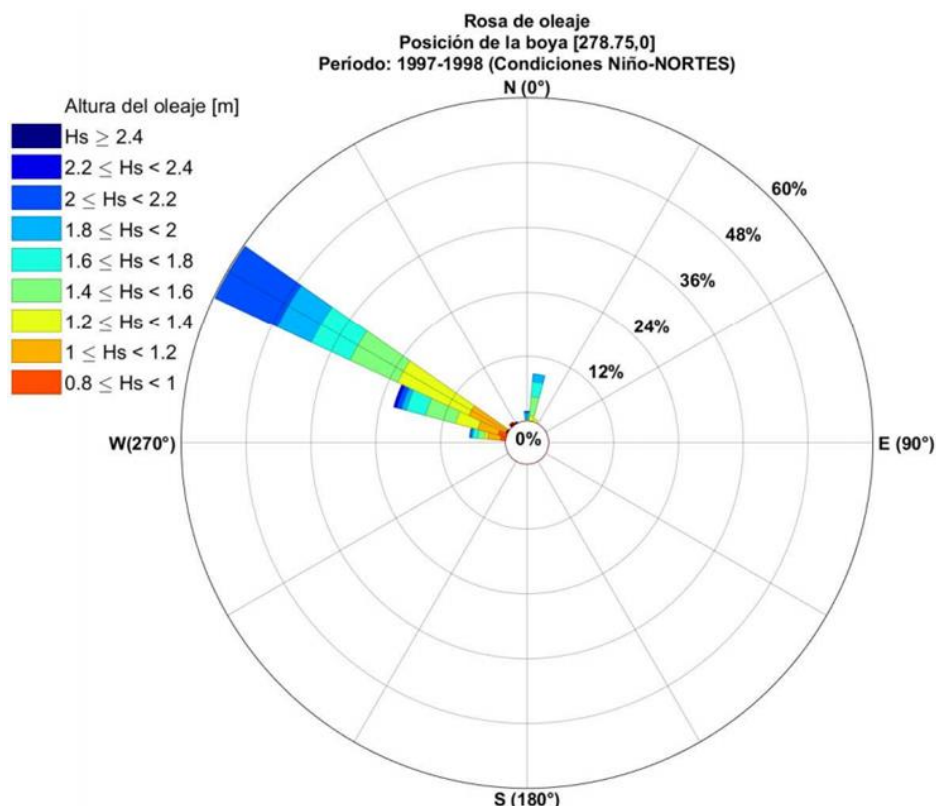


Figura 3.1 Altura significativa y dirección de oleaje del norte del WAVEWATCH III para condiciones ENSO en el período de 1997-1998 (Autoras, 2021)

En la Figura 3.2 se observa la velocidad y dirección del viento. Esta nos indica una predominancia en los vientos del norte para el periodo de 1997-1998, con velocidades de hasta 9 m/s. En la Figura 3.3, se muestra el periodo, siendo el

mayor porcentaje de ocurrencia de 40% para olas provenientes del norte en un intervalo de 14.56-16.23 s.

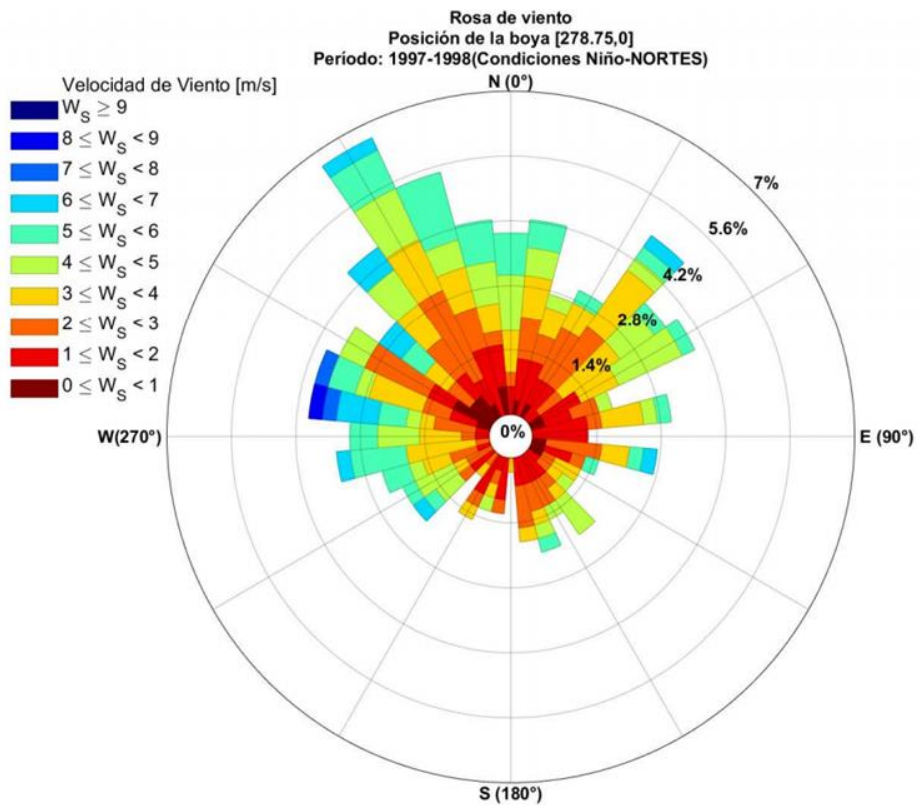


Figura 3.2 Velocidad y dirección del viento para direcciones de oleaje proveniente del norte del WW III en condiciones ENSO en el período de 1997-1998 (Autoras, 2021)

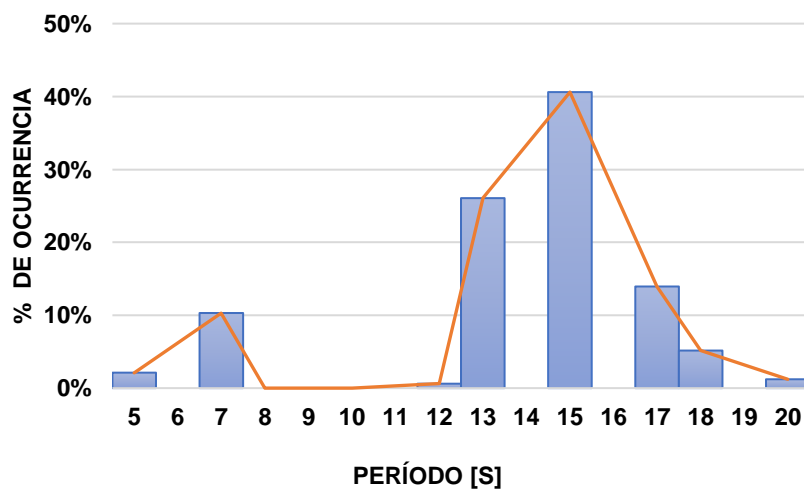


Figura 3.3 Histograma de períodos de olas para 1997-1998 en condiciones ENSO para olas provenientes del norte (Autoras, 2021)

3.2 Resultados de la ETAPA 5

3.2.1 Calibración y validación: MIKE 21 SW

Los parámetros que se validaron fueron los siguientes:

- Altura y período

En la Tabla 3.1 y 3.2, se observa los valores correspondientes a la altura significativa y período pico.

Tabla 3.1 Altura de oleaje en Jaramijó veril 20 – Validación SW (Autoras, 2021)

Variable	Acta Oceanográfica del Pacífico		Modelo SW	
	Feb-1997	Feb-1998	Feb-1997	Feb-1998
$H_{1/3}$	1.32 [m]	1.54 [m]	1.38 [m]	2.04 [m]

Tabla 3.2 Período de oleaje en Jaramijó veril 20 – Validación SW (Autoras, 2021)

Variable	Acta Oceanográfica del Pacífico		Modelo SW	
	Feb-1997	Feb-1998	Feb-1997	Feb-1998
T	23 [s]	23 [s]	17.4 [s]	19.2 [s]

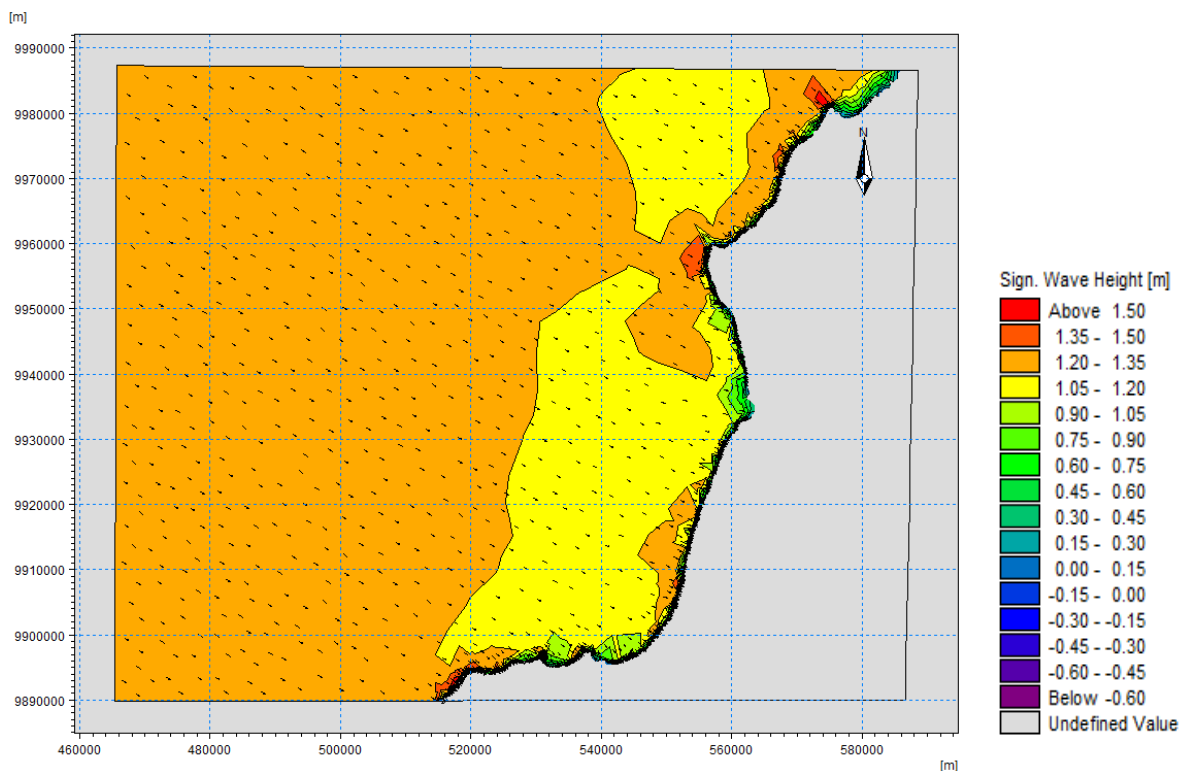


Figura 3.4 Altura significativa de oleaje en condiciones ENSO (Autoras, 2021)

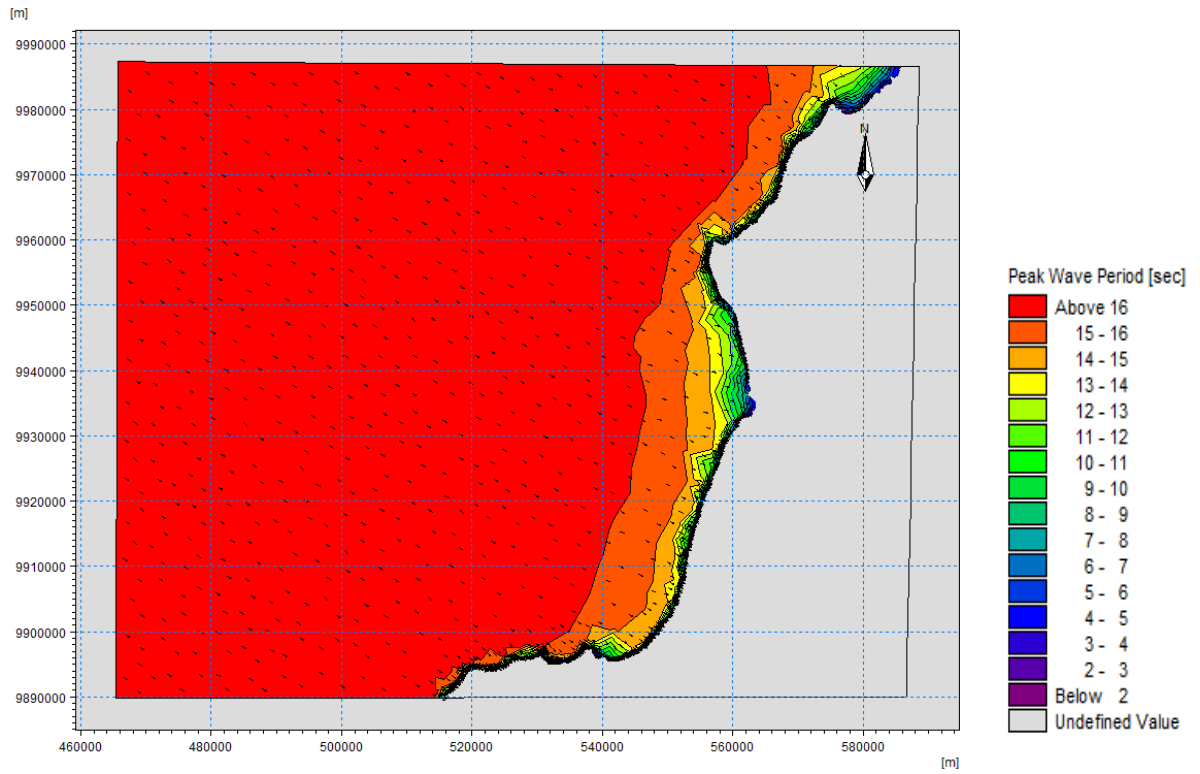


Figura 3.5 Periodo pico de oleaje en condiciones ENSO (Autoras, 2021)

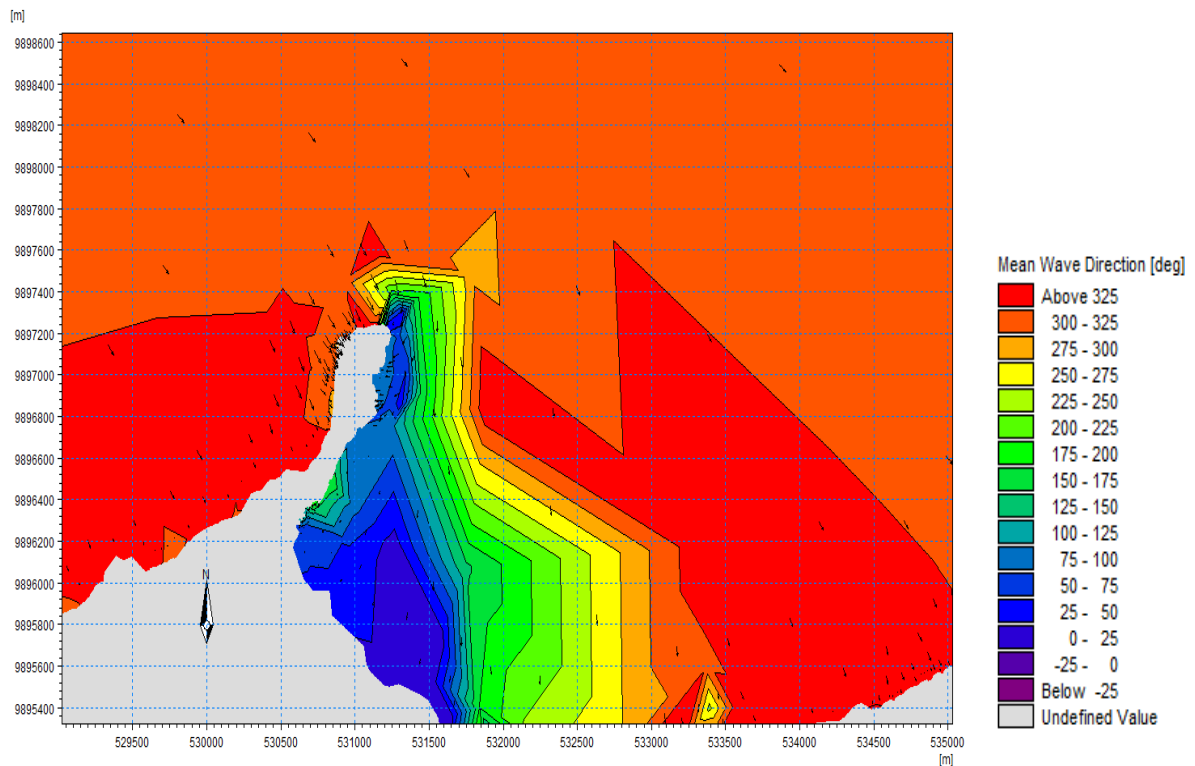


Figura 3.6 Dirección de oleaje proveniente del Noroeste en condiciones ENSO (Autoras, 2021)

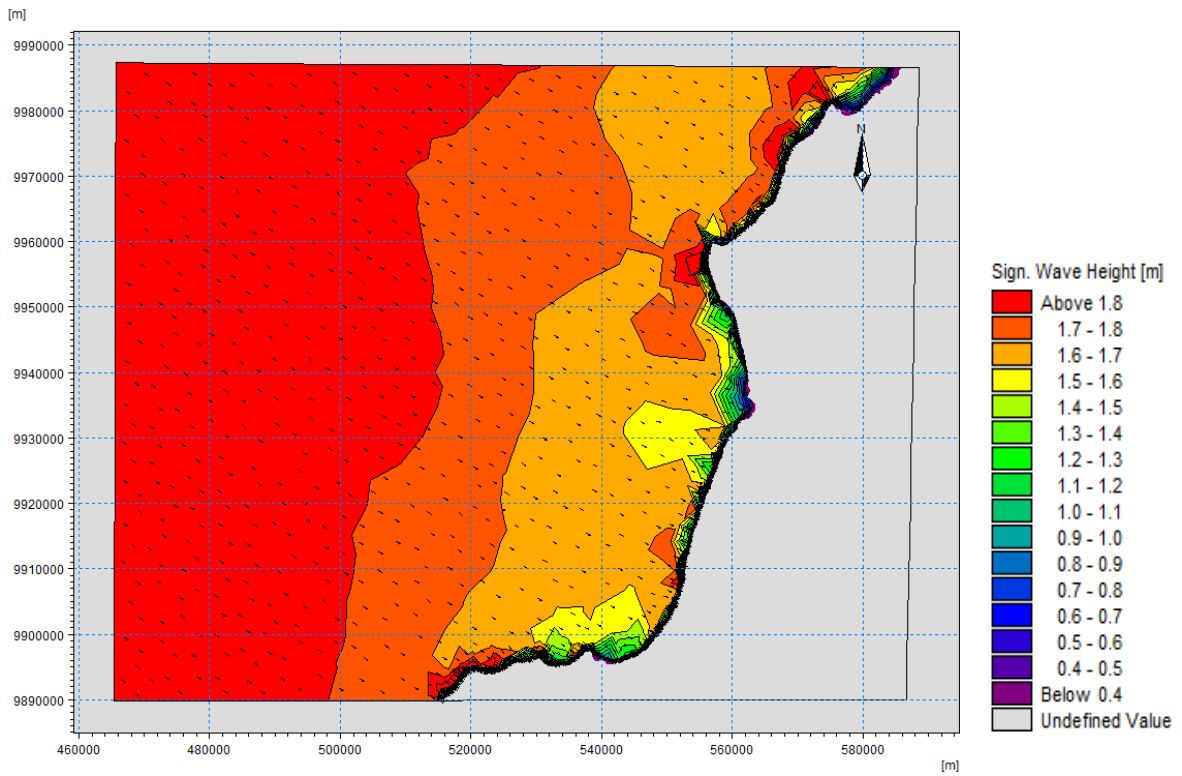


Figura 3.7 Altura significativa de oleaje para cambio climático con proyección 2050 (Autoras, 2021)

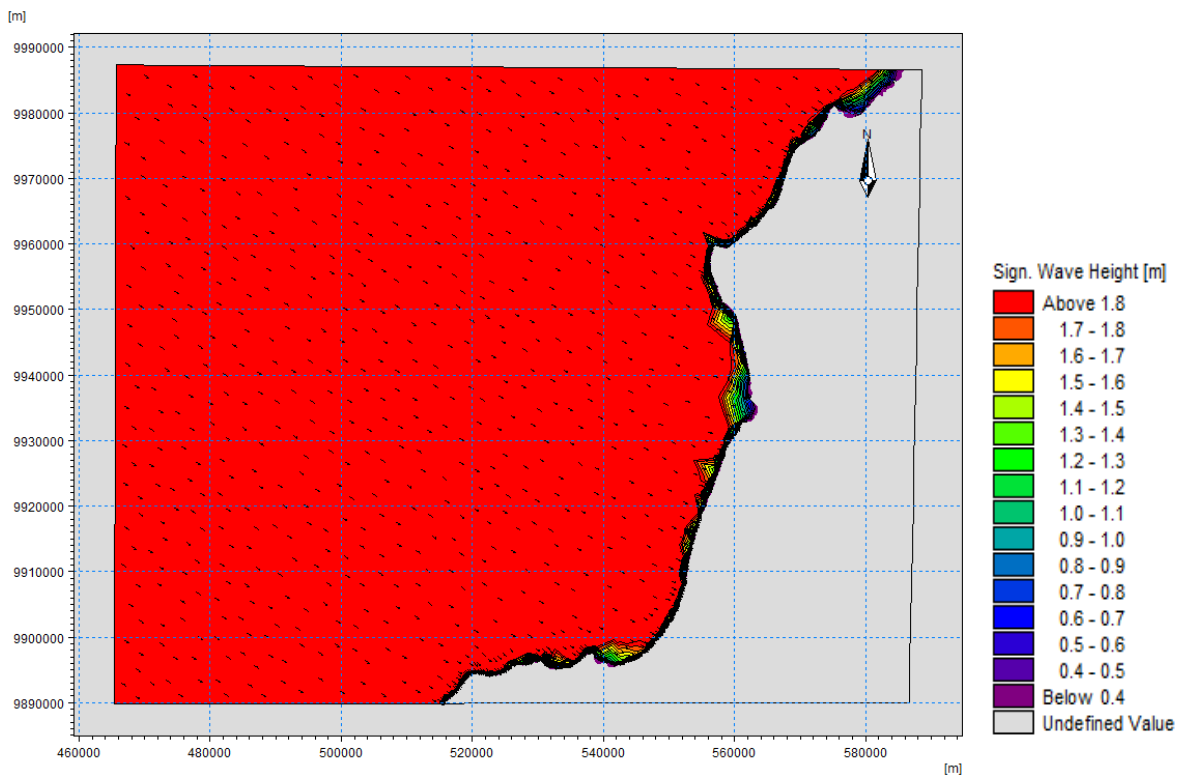


Figura 3.8 Altura significativa de oleaje para cambio climático con proyección 2100 (Autoras, 2021)

3.2.2 Calibración y validación: MIKE 21 BW

Las variables de calibración para este módulo corresponden a la onda interna, capa porosa y capa de esponja. Para la generación de la onda se tomaron datos de altura, periodo y dirección de ola en el veril 20 bajo condiciones ENSO 1997-1998. Otros parámetros de calibración fueron la rugosidad de fondo y viscosidad de Eddy que se los colocó acorde a información bibliográfica (Tabla 3.3).

Tabla 3.3 Parámetros de calibración BW (Autoras, 2021)

Altura de ola	1.1 m
Periodo de ola	11 s
Dirección de ola	30°
Capa de esponja	20 capas
Capa de porosidad	3 capas
Rugosidad de fondo	10 $m^{1/2}/s$
Viscosidad de Eddy	12 m^2/s

Con respecto a la validación de los resultados del modelo BW, fue comparado con los resultados obtenidos del método de los diagramas de difracción de olas según el Shore Protection Manual (1984). Se hizo uso del diagrama de 30 grados de acuerdo con los resultados obtenidos del modelo SW. Se validó la variable de altura de ola en el área afectada por la difracción.

Tabla 3.4 Altura de ola difractada dentro de TPM – Comparación entre los resultados del módulo BW y diagramas SPM 1984 (Autoras, 2021)

Coordenadas UTM [m]	Diagramas de difracción de olas [m]	Modelo BW [m]
P1 [531121, 9896926]	0.23	0.25
P2 [531145, 9897124]	0.22	0.19
P3 [531082, 9897116]	0.13	0.18
P4 [531053, 9897112]	0.11	0.15

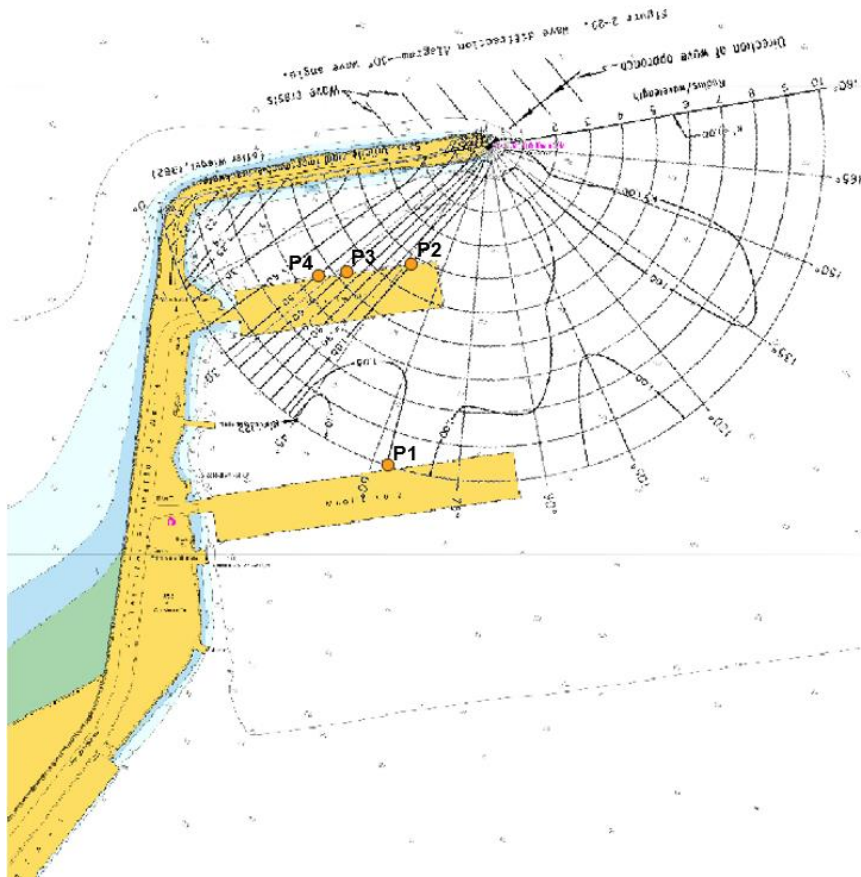


Figura 3.9 Puntos escogidos para validación en diagrama de difracción (Autoras, 2021)

Los valores que dan como resultado de la simulación para el evento ENSO 1997-1998 se ajustan muy bien a los calculados teóricamente, con apenas una diferencia de 0.05 m.

3.3 Resultados de la ETAPA 6

Los resultados del SW fueron obtenidos para el veril 20 y procesados en MATLAB, para el oleaje ENSO se observa en la Figura 3.10 que se tienen alturas significativas en el rango de 0.5-1 m con direcciones de 310°-330°. Por otro lado, el periodo pico se muestra en la Figura 3.11 en el cual, el rango de periodo que tiene mayor porcentaje de ocurrencia se encuentra entre 11.93-13.18 s. Adicionalmente, para la proyección de cambio climático 2050 en la Figura 3.12 se observa que abarcan más alturas significativas en el rango de 0.5-1 m con direcciones de 310°-330° pero se evidencia la ampliación con respecto al rango de alturas significativas entre 1.5-2 m para las direcciones en el rango de 325°-

335° y 350°-5°. En la Figura 3.13 se observa la ampliación respecto al rango de alturas de 0.5-1 m en direcciones de 310°-330° y también para las direcciones 325°-330° la ampliación en el rango de alturas significativas de 2-2.5 m.

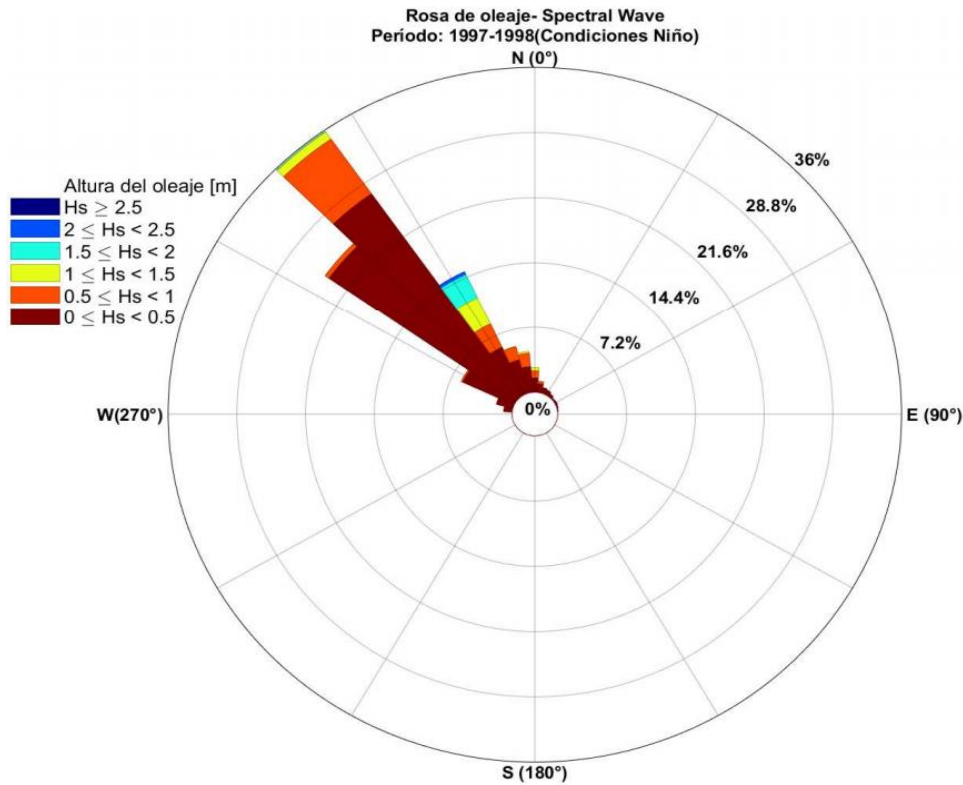


Figura 3.10 Altura significativa y dirección del oleaje del MIKE 21SW en condiciones ENSO en el periodo de 1997-1998 (Autoras,2021)

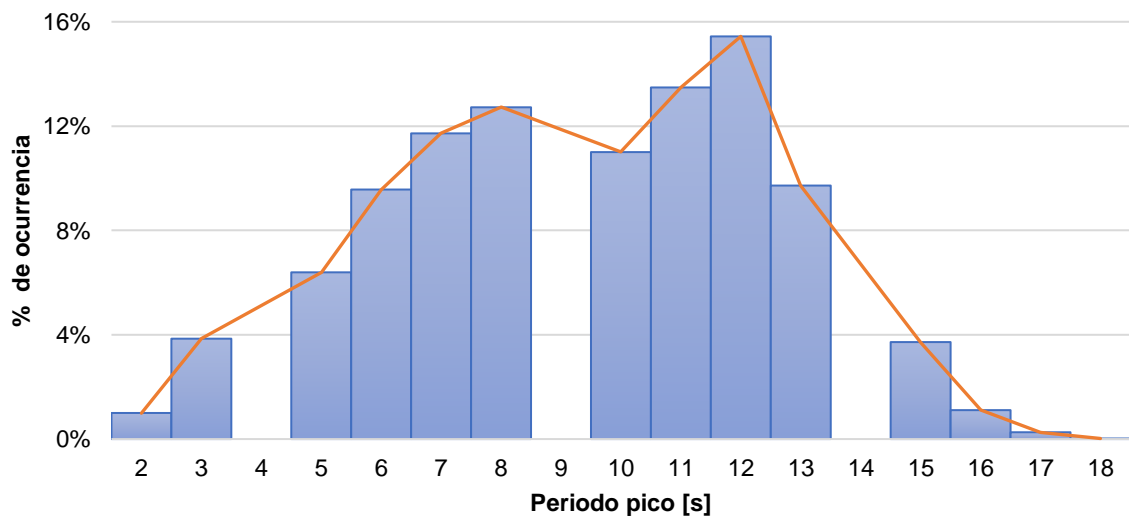


Figura 3.11 Histograma de periodo pico del SW en condiciones ENSO en el periodo de 1997-1998 (Autoras, 2021)

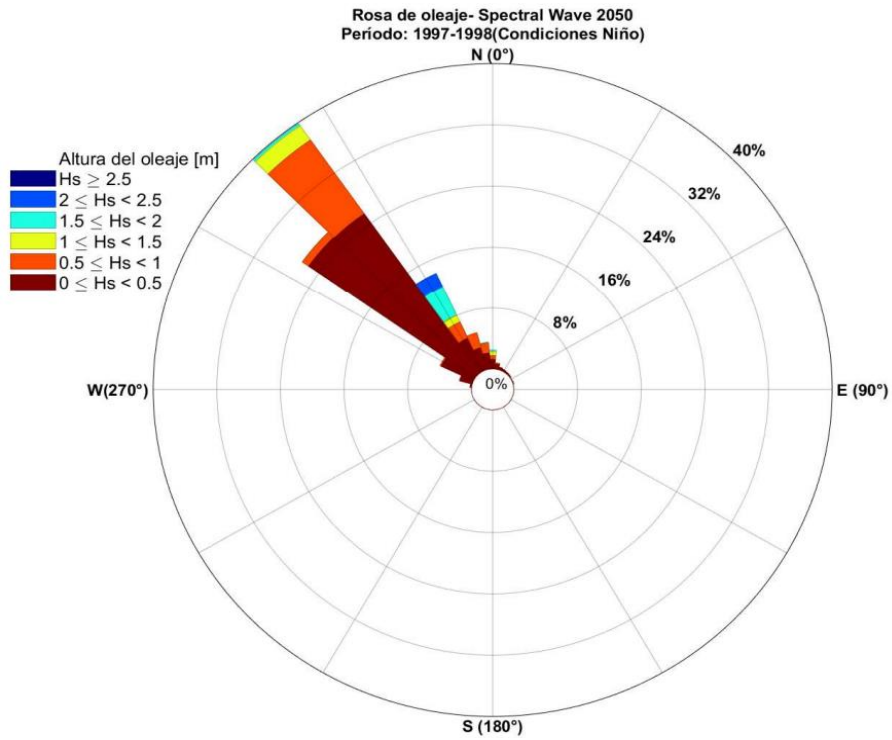


Figura 3.12 Altura significativa y dirección del oleaje del MIKE 21SW en CC para 2050 (Autoras, 2021)

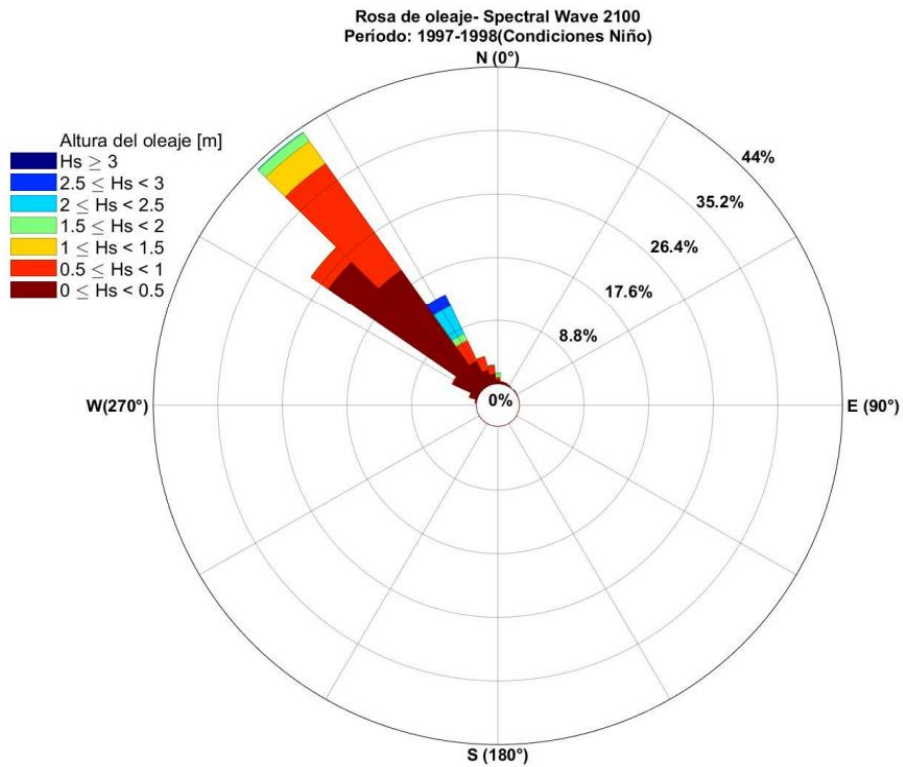


Figura 3.13 Altura significativa y dirección del oleaje MIKE 21SW en CC 2100 (Autoras, 2021)

3.3.1 Oleaje ENSO: estado actual

La Figura 3.14 muestra los puntos escogidos para el análisis del coeficiente de perturbación, en la Tabla 3.5 se indican las coordenadas de dichos puntos.

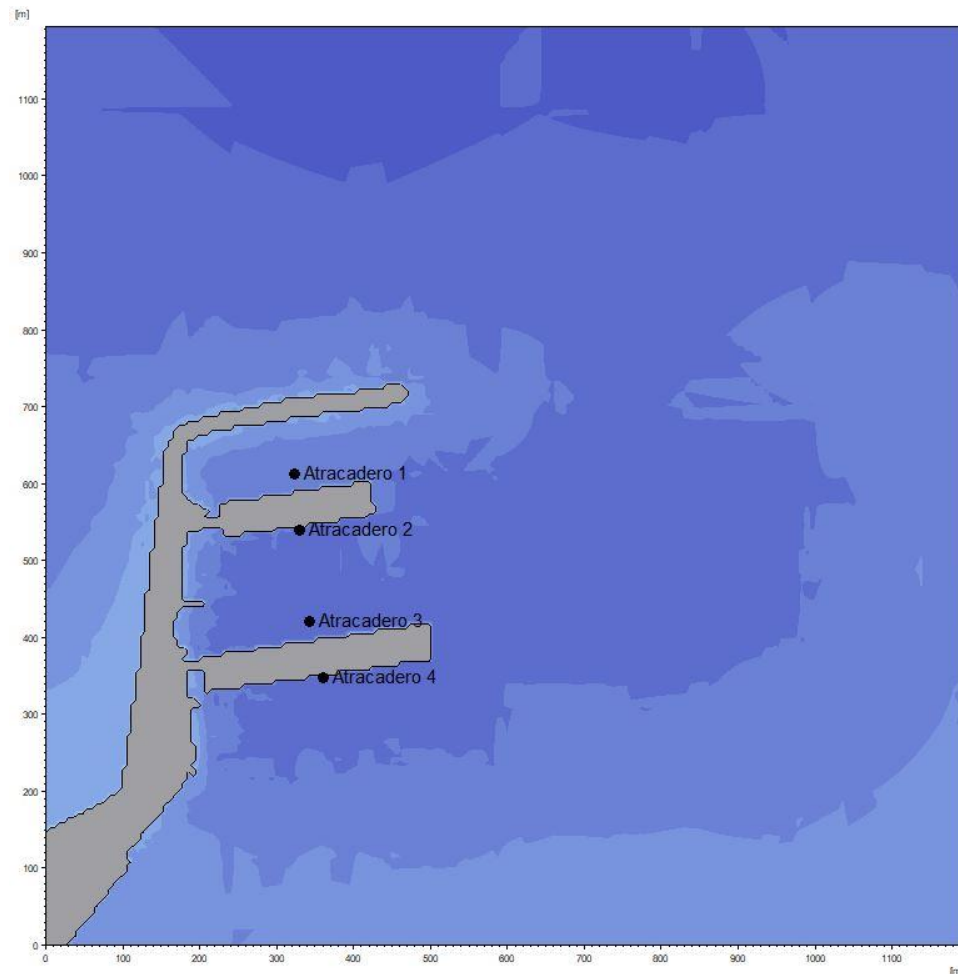


Figura 3.14 Puntos de análisis para coeficientes de perturbación (Autoras, 2021)

Tabla 3.5 Coordenadas de puntos de análisis para coeficientes de perturbación (Autoras, 2021)

Punto de análisis	Coordenada X [m]	Coordenada Y [m]
Atracadero 1	531085.88	9897121.68
Atracadero 2	531093.15	9897052.42
Atracadero 3	531110.74	9896927.17
Atracadero 4	531129.03	9896854.70

Como resultado a las características de oleaje ENSO anteriormente mencionadas, se muestran en las Figuras 3.15-3.19 el coeficiente de perturbación de olas y el patrón de elevación superficial de las olas correspondiente a las cinco diferentes direcciones de oleaje. Se observa que con el ángulo de 330° existe valores mayores de coeficiente de perturbación a los exteriores de las instalaciones de TPM y son pronunciados los trenes de ondas incidentes a diferencia del ángulo de 360° , en el cual se observan valores menores de coeficiente de perturbación a los exteriores, pero a medida que entramos a la región de ángulos NE, como los de 15° - 30° se observa coeficientes de perturbación mayores a los exteriores que a su vez avanzan a los muelles internacionales, además con los gráficos de elevación superficial se observa cómo son pronunciados los trenes de onda demostrando mayores agitaciones.

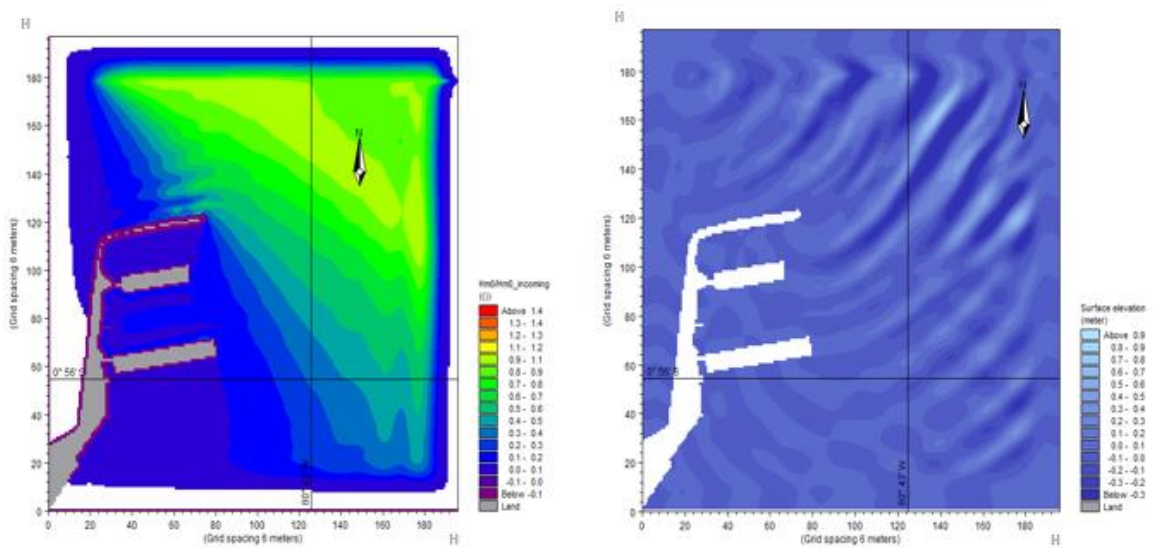


Figura 3.15 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 330° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)

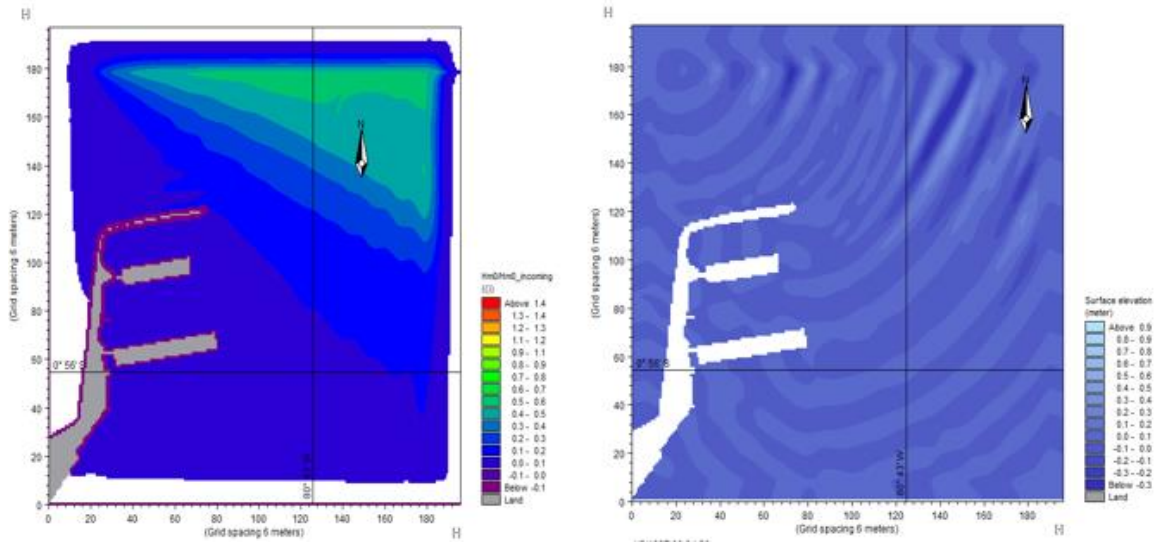


Figura 3.16 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)

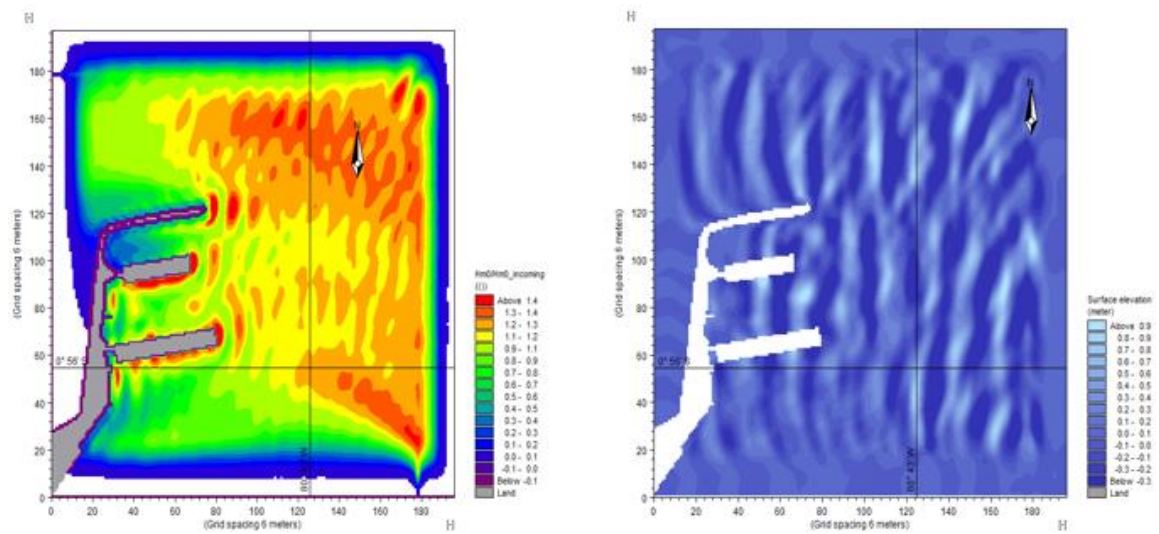


Figura 3.17 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)

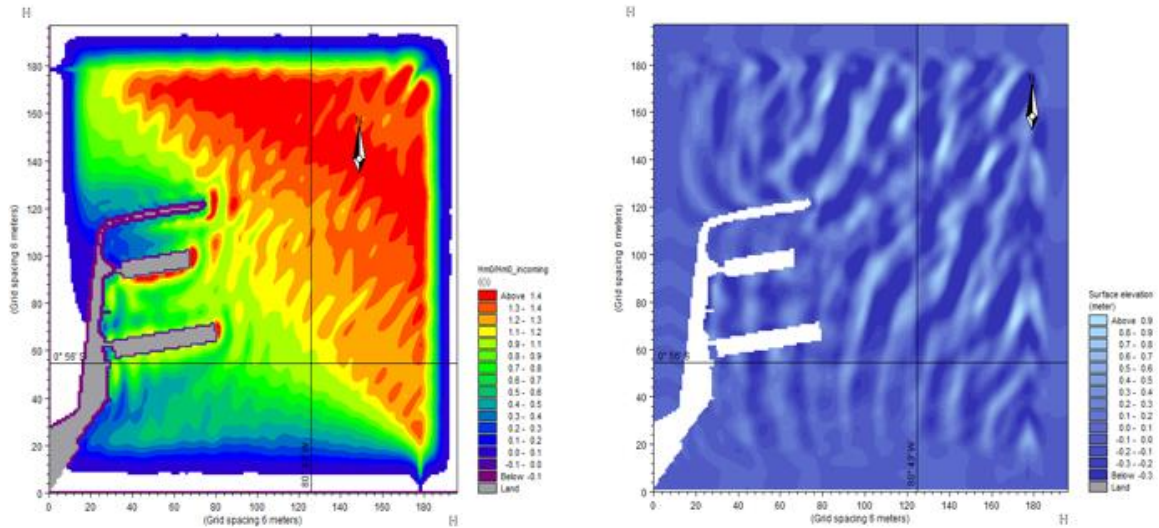


Figura 3.18 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)

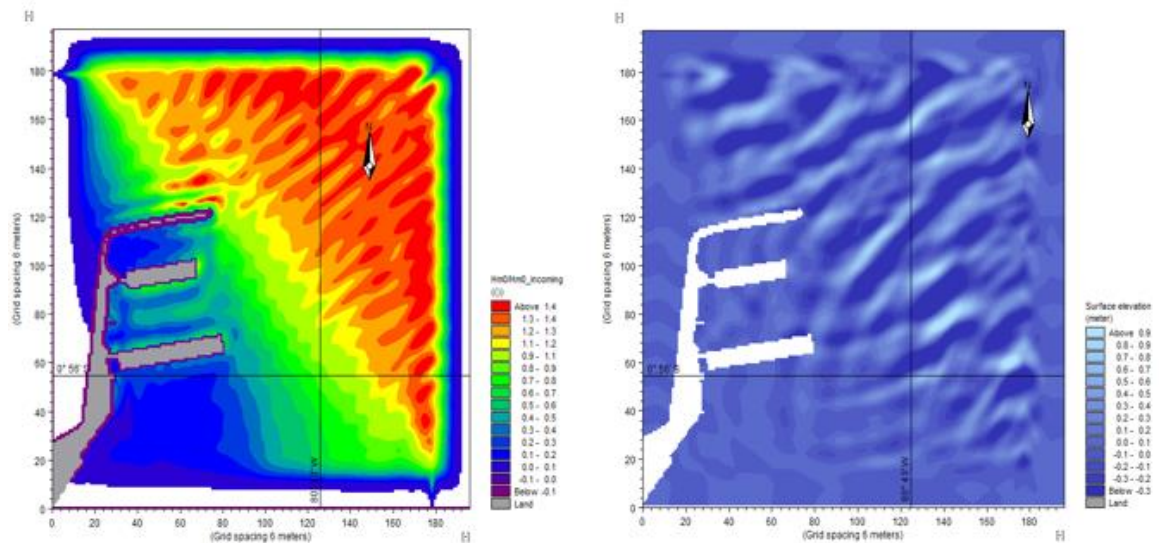


Figura 3.19 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)

Por otra parte, se muestran los coeficientes de perturbación de olas en la Tabla 3.6. Los niveles máximos de agitación de olas se encuentran en casi todos los atracaderos con un coeficiente de perturbación mayor al 50% para las direcciones 15°-30° (excepto el atracadero 1) y en la dirección de 60° solo presenta mayor agitación en el atracadero 2. Por lo que, de forma general, se evidencia que la estructura de protección que tiene el puerto no suprime las olas que vienen desde 15° hasta 30°. Para la dirección 15° son responsables de alturas mayores a 0.69 m, siendo el atracadero 2 la que tiene mayor altura de

1.46 m. En cambio, la dirección 30° presenta alturas mayores a 0.61 m, siendo el atracadero 2 la que tiene mayor altura de 1.16 m.

Tabla 3.6 Coeficiente de perturbación de olas (%) en los atracaderos de TPM (Estado actual: ENSO) (Autoras, 2021)

Dirección	330°	360°	15°	30°	60°
Atracadero 1	7.7	2.6	57	49	29
Atracadero 2	12	3.3	100	100	52
Atracadero 3	13	4.4	100	71	41
Atracadero 4	4.2	1.8	100	100	29

3.3.2 Oleaje ENSO + cambio climático: estado actual

A partir de las características de ola para la proyección 2050 y 2100 anteriormente mencionadas, se muestra como resultados las Figuras 3.20 - 3.29, se observa que los ángulos de 330° y 360° abarcan mayor área con coeficientes de perturbación mayores en los exteriores de las instalaciones, y también que los ángulos de 15°-30° presentan incremento en los coeficientes de perturbación y abarcan mayor área en los muelles internacionales.

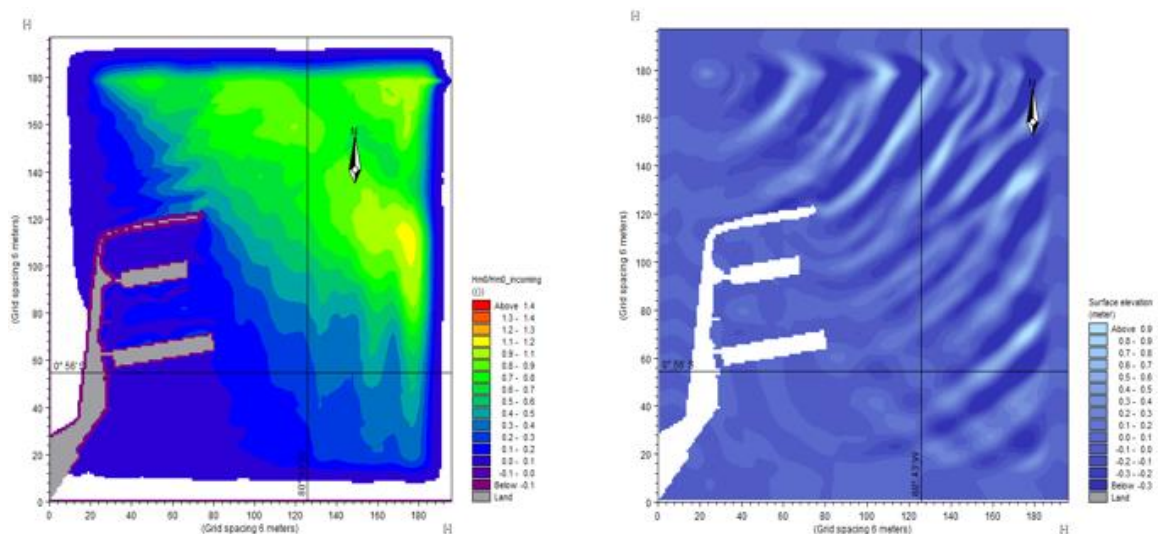


Figura 3.20 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

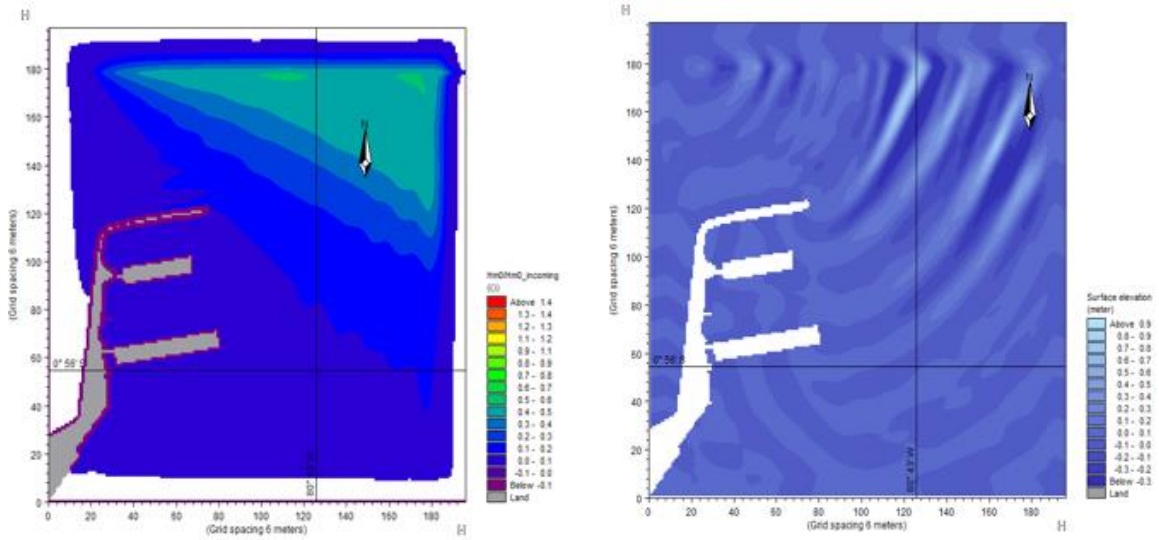


Figura 3.21 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

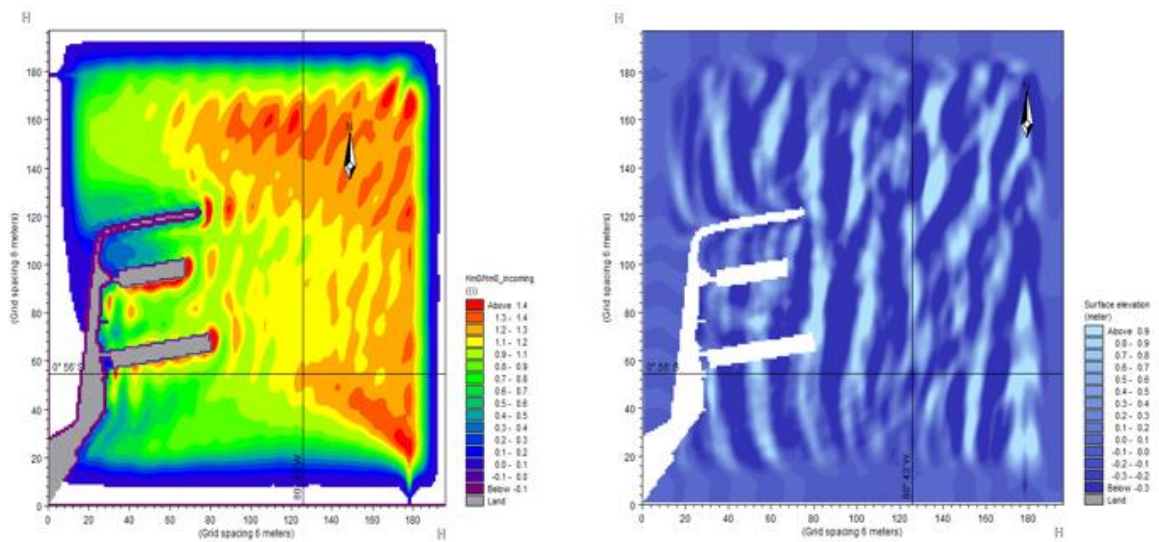


Figura 3.22 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

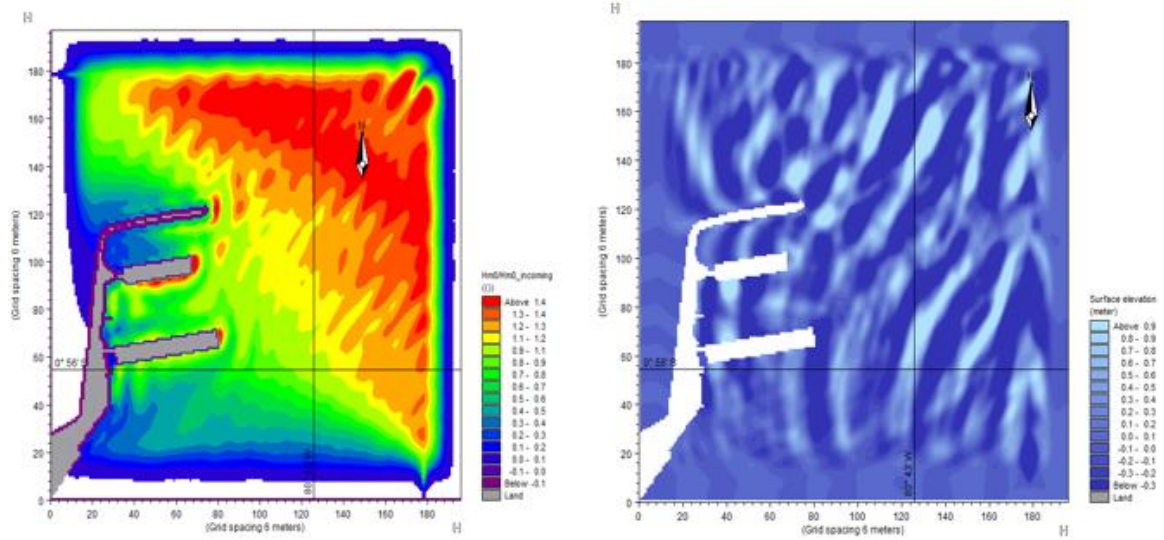


Figura 3.23 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

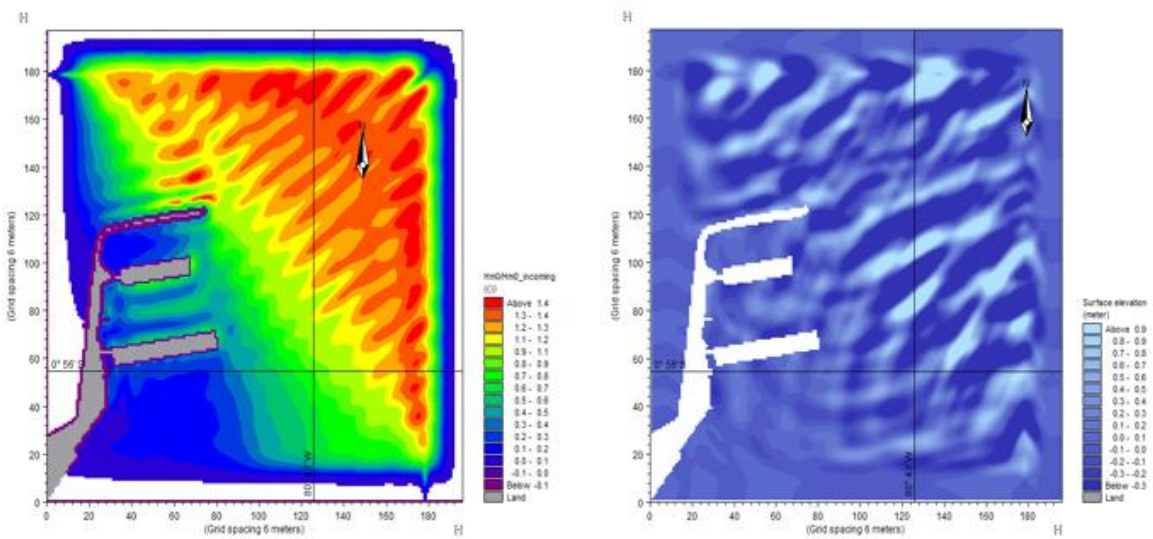


Figura 3.24 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Estado actual: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

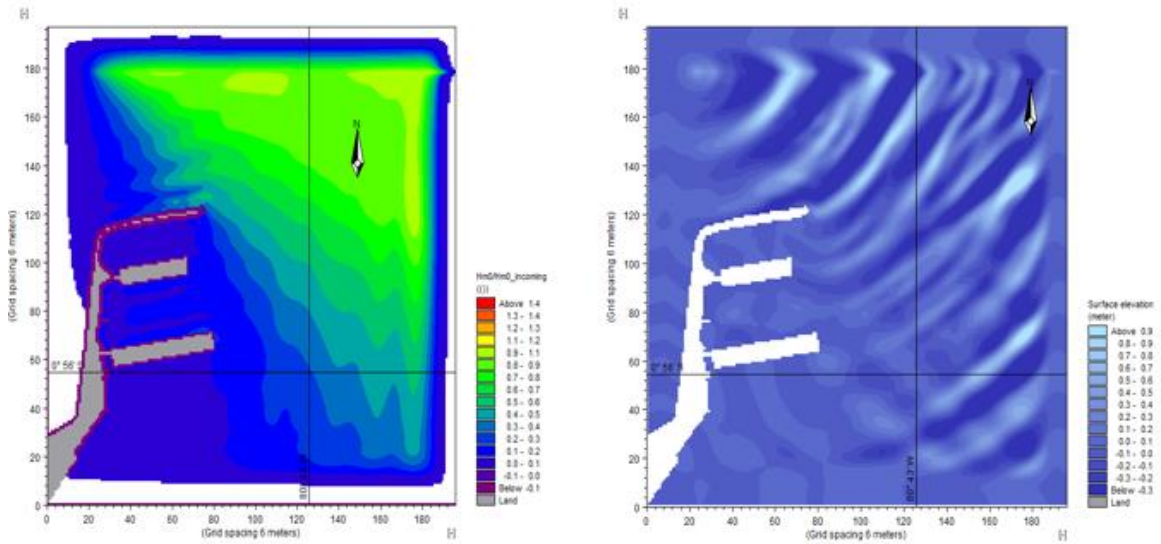


Figura 3.25 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

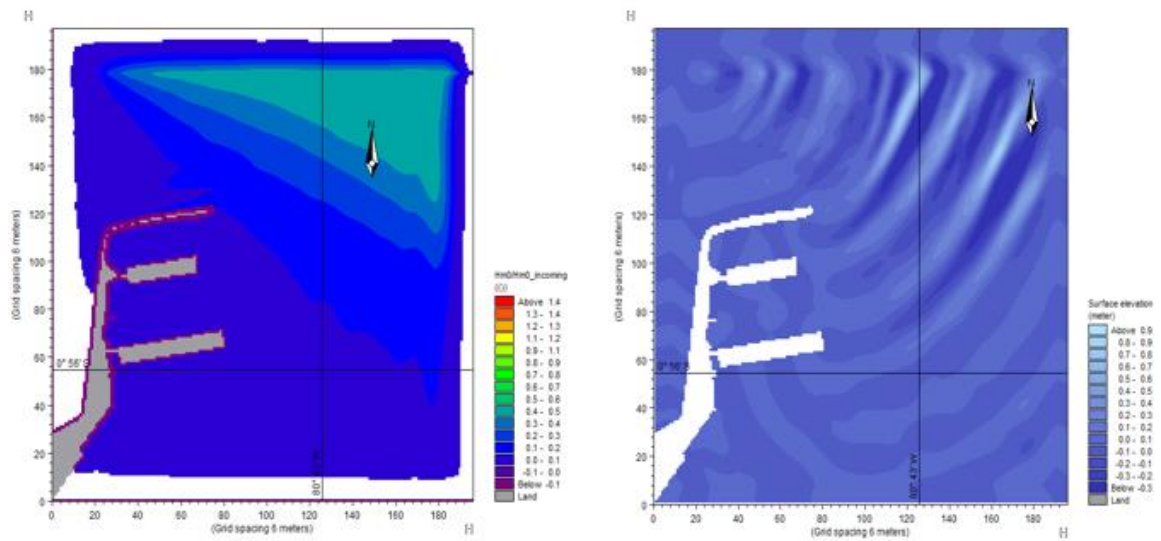


Figura 3.26 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

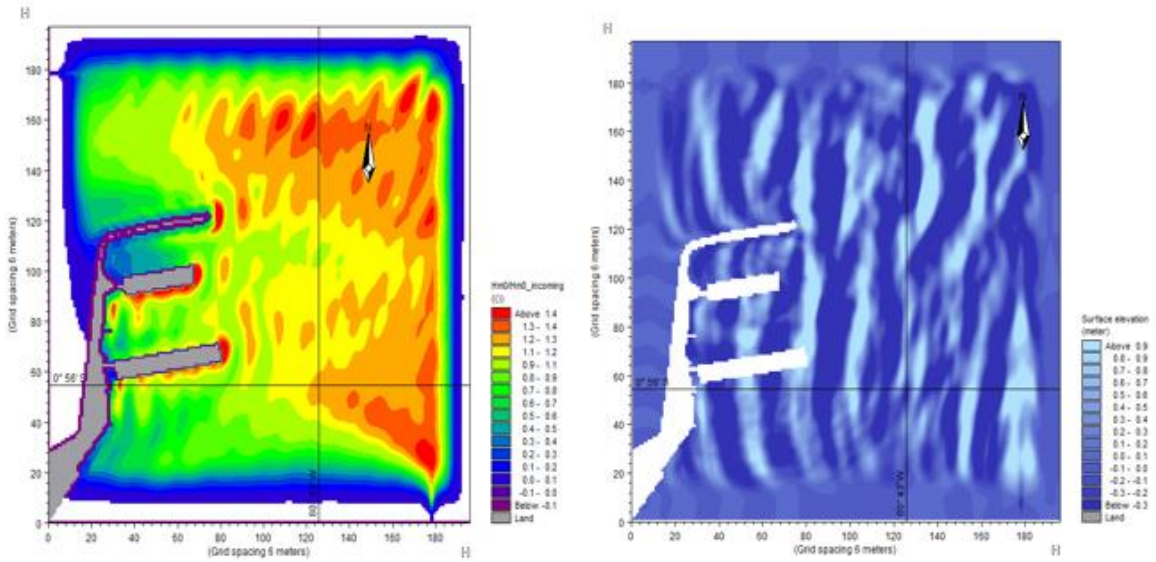


Figura 3.27 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

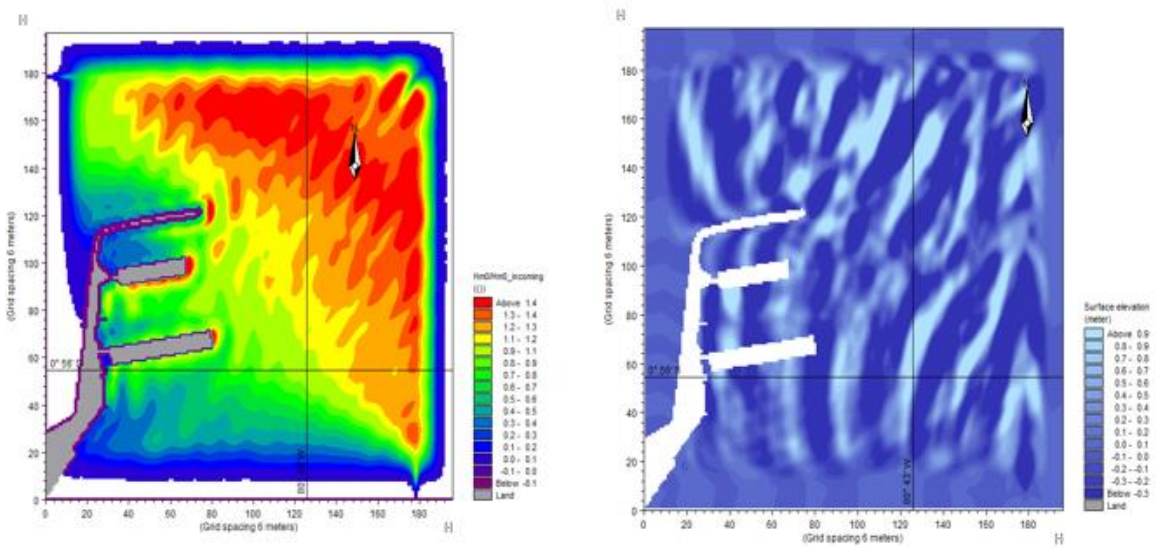


Figura 3.28 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

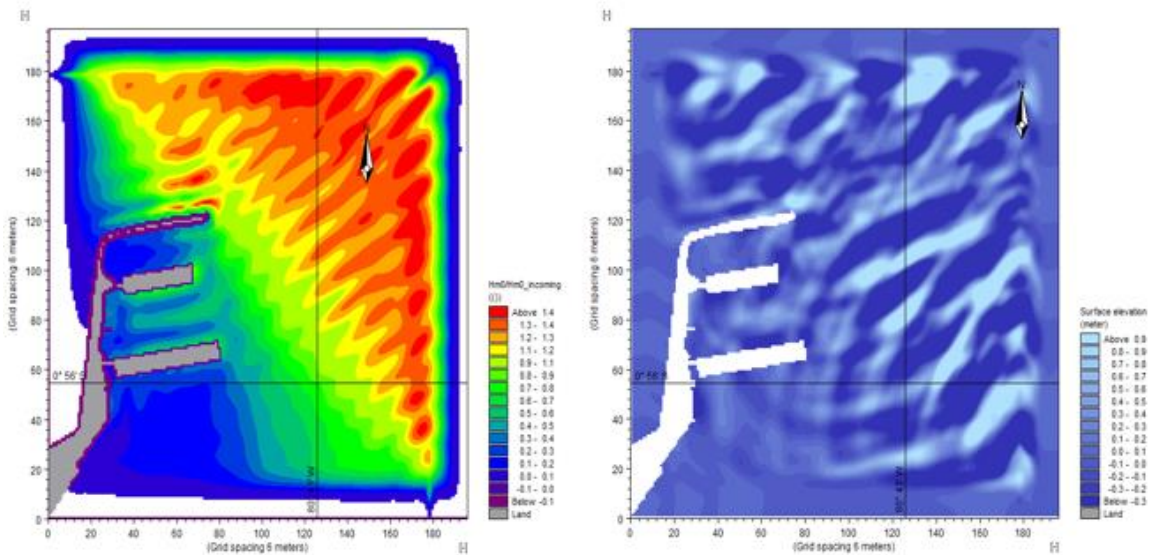


Figura 3.29 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

Los coeficientes de perturbación para las proyecciones 2050 y 2100 se encuentran en la Tabla 3.7. Los niveles máximos de agitación se dan en casi todos atracaderos con un coeficiente de perturbación mayor al 50% en las direcciones 15° y 30° (excepto en el atracadero 1), para la dirección de 60° solo el atracadero 2 presenta mayor agitación con un coeficiente mayor al 50%. Con esto se tiene que, para la dirección de 15° una altura máxima de 2.85 m (proyección 2050) y 3.08 m (proyección 2100). Por otra parte, para la dirección de 30° se tiene una altura máxima de 2.51 m (proyección 2050) y 2.74 m (proyección 2100), en el atracadero 2.

Tabla 3.7 Coeficiente de perturbación de olas (%) para los atracaderos de TPM (Estado actual: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

Dirección	Proyección 2050					Proyección 2100				
	330°	360°	15°	30°	60°	330°	360°	15°	30°	60°
Atracadero 1	7.7	2.9	57	48	29	8.0	3	57	48	29
Atracadero 2	13	3.5	100	100	55	15	4	100	100	58
Atracadero 3	15	5.1	100	74	48	16	5.2	100	77	49
Atracadero 4	4.9	2	100	88	29	5.37	2	100	89	29

3.3.1 Oleaje ENSO: rompeolas modificado Caso 1

Los resultados presentados desde la Figura 3.30-3.34 presentan un alargamiento del rompeolas de 200 m (Caso 1). De manera general observamos que las perturbaciones producto del oleaje generado en las direcciones 330° y 360° son mínimas. También se observa que el oleaje de 330° tiene más alcance al interior de la terminal que el oleaje de 360° . Por otro lado, en las olas provenientes de los ángulos de 15° , 30° y 60° si se observan coeficientes de perturbación altos en los muelles.

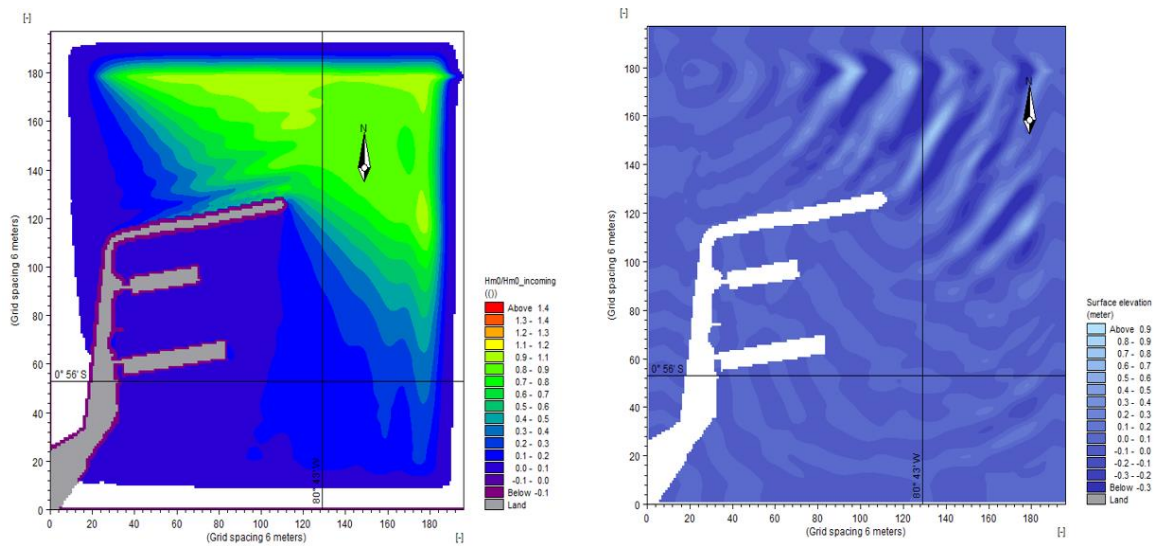


Figura 3.30 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 330° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)

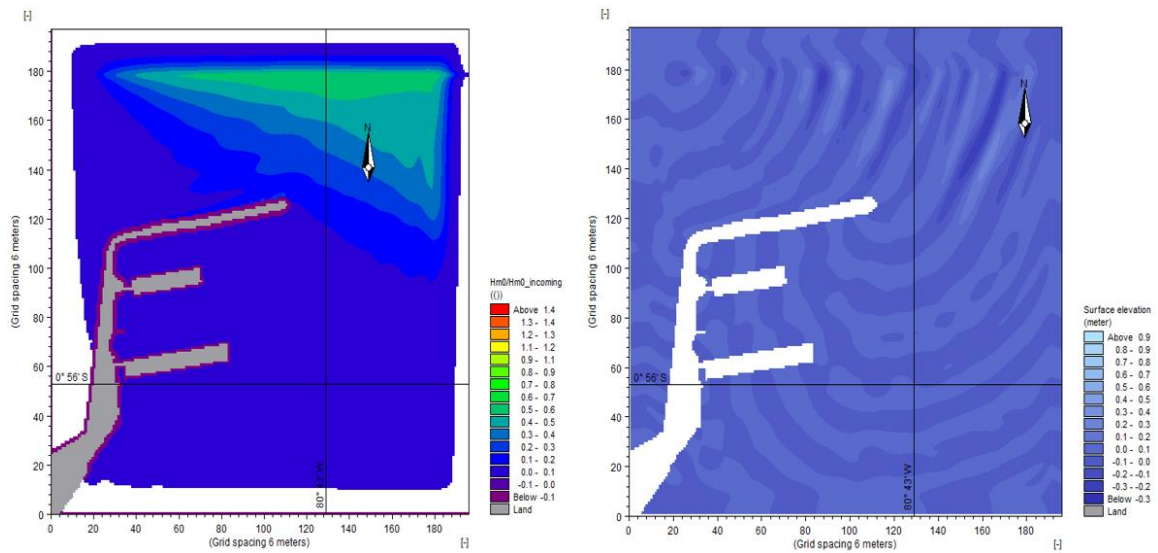


Figura 3.31 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 360° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)

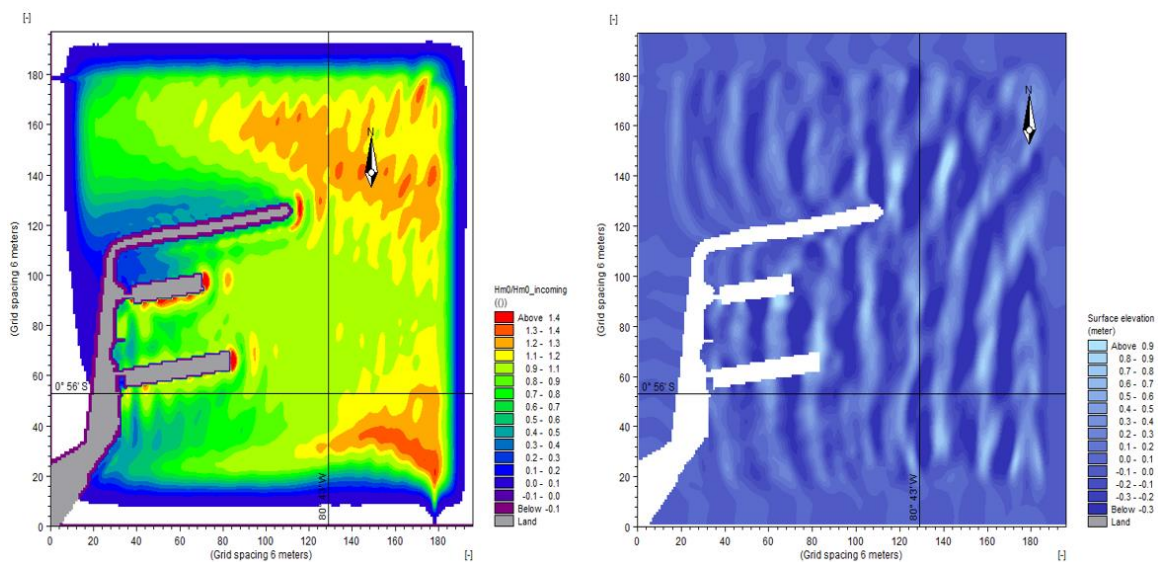


Figura 3.32 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 15° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)

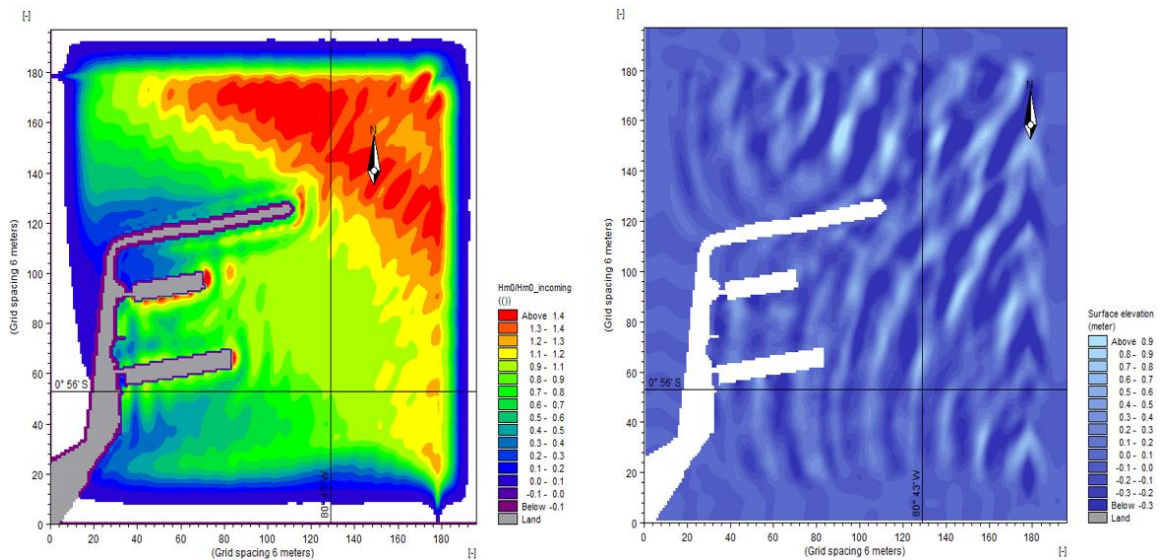


Figura 3.33 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 30° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)

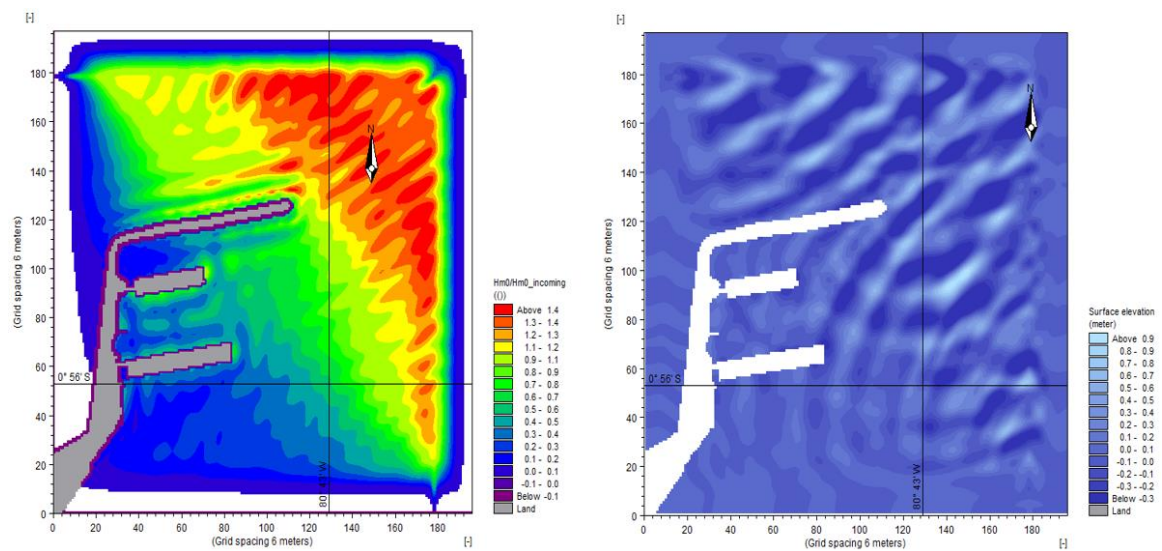


Figura 3.34 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 60° (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)

Para el caso 1, evento ENSO 1997-1998, los coeficientes de perturbación de olas se muestran en la Tabla 3.8. De acuerdo con los resultados, todos los atracaderos presentan coeficientes de perturbación mínimos con el oleaje incidente en las direcciones de 330° y 360°, menor al 5%. El oleaje proveniente de los 60° presenta coeficientes de perturbación entre el 23% y 50%, causando problemas solo en el atracadero 2. Por otro lado, los niveles máximos de agitación de olas se encuentran en los atracaderos 2 y 4 con un coeficiente de

perturbación mayor al 50% para las direcciones de oleaje de 15° y 30°. Sin embargo, es importante mencionar que, en comparación con los resultados del estado actual de los rompeolas presentados en la tabla 3.6, con esta modificación los valores de coeficientes de perturbación disminuyen en todos los puntos de análisis. Por lo que, de forma general, se evidencia que el alargamiento de la estructura de protección costera si disminuye la perturbación de las olas en los atracaderos.

Tabla 3.8 Coeficiente de perturbación de olas (%) en los atracaderos de TPM (Caso 1: ENSO) (Autoras, 2021)

Dirección	330°	360°	15°	30°	60°
Atracadero 1	3	1	47	35	24
Atracadero 2	5	1	100	100	50
Atracadero 3	5	2	49	49	23
Atracadero 4	4	1	100	83	35

3.3.2 Oleaje ENSO + cambio climático: rompeolas modificado caso 1

A partir de las características de ola para la proyección 2050 y 2100 anteriormente mencionadas y el alargamiento de 200 m al rompeolas, se muestra como resultados las Figuras 3.35-3.44.

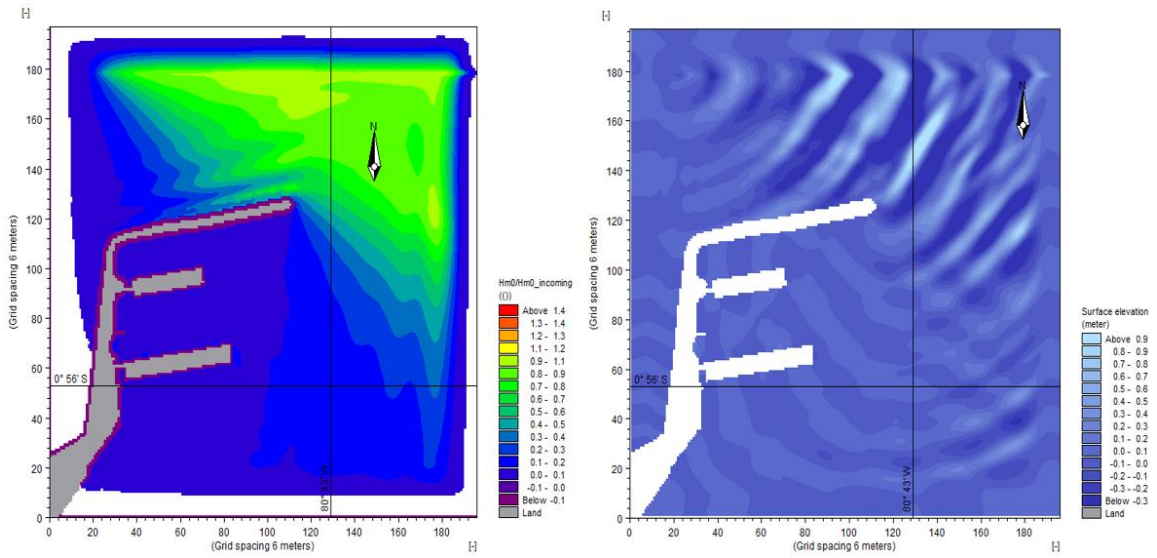


Figura 3.35 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

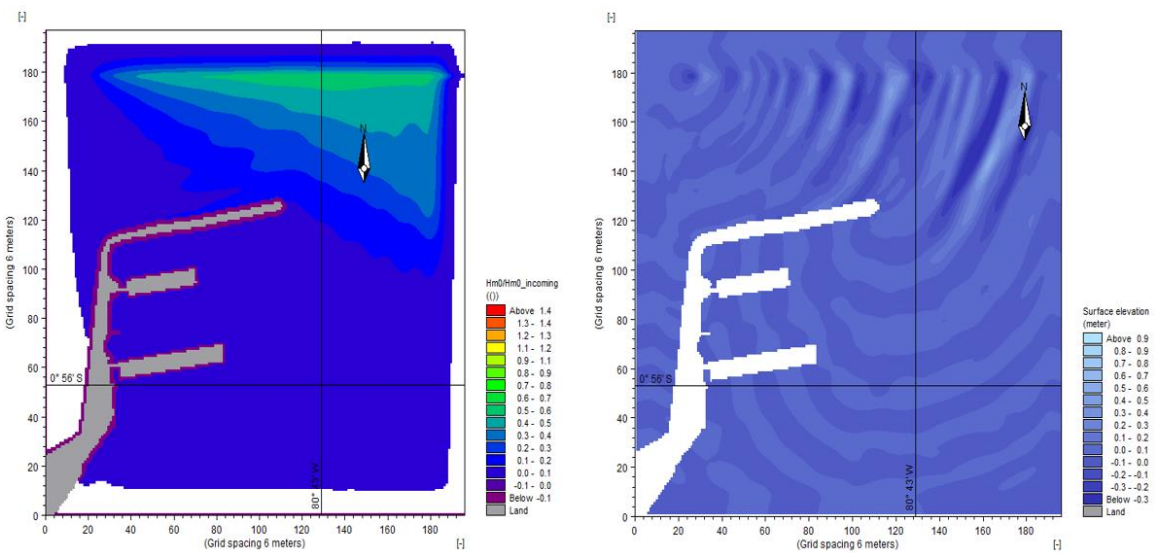


Figura 3.36 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

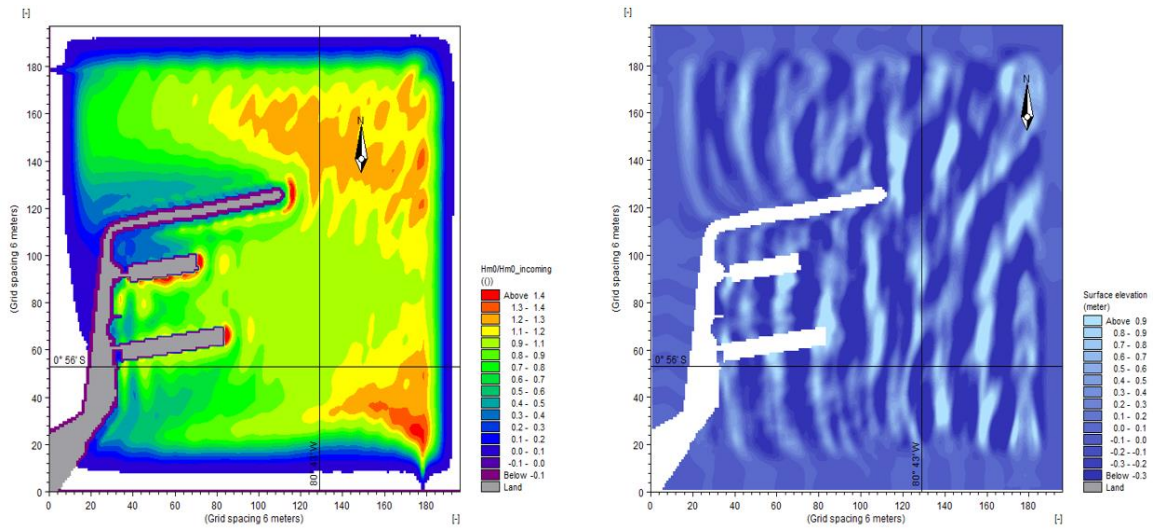


Figura 3.37 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

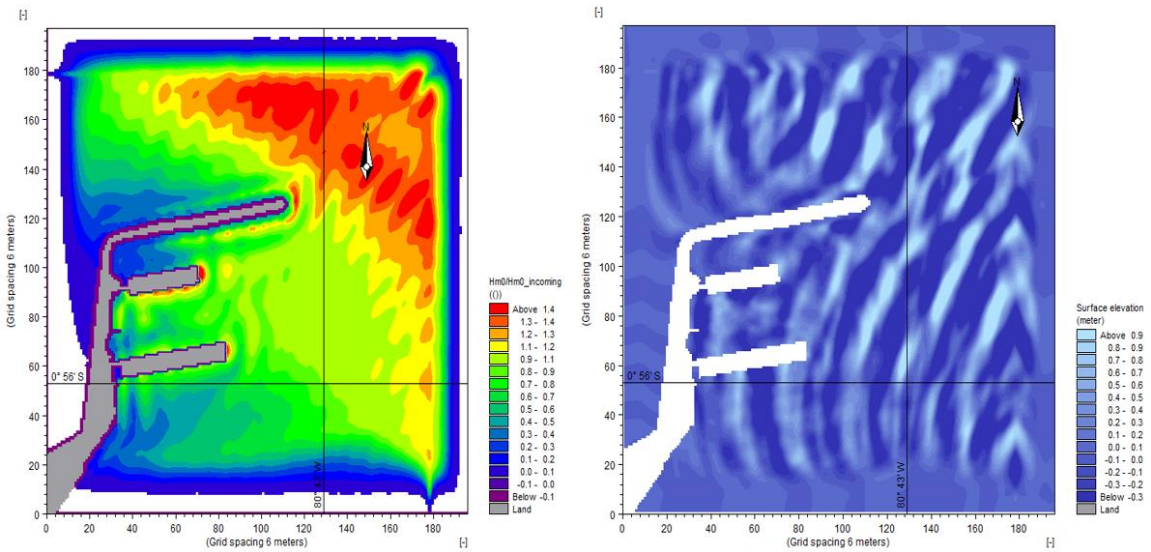


Figura 3.38 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

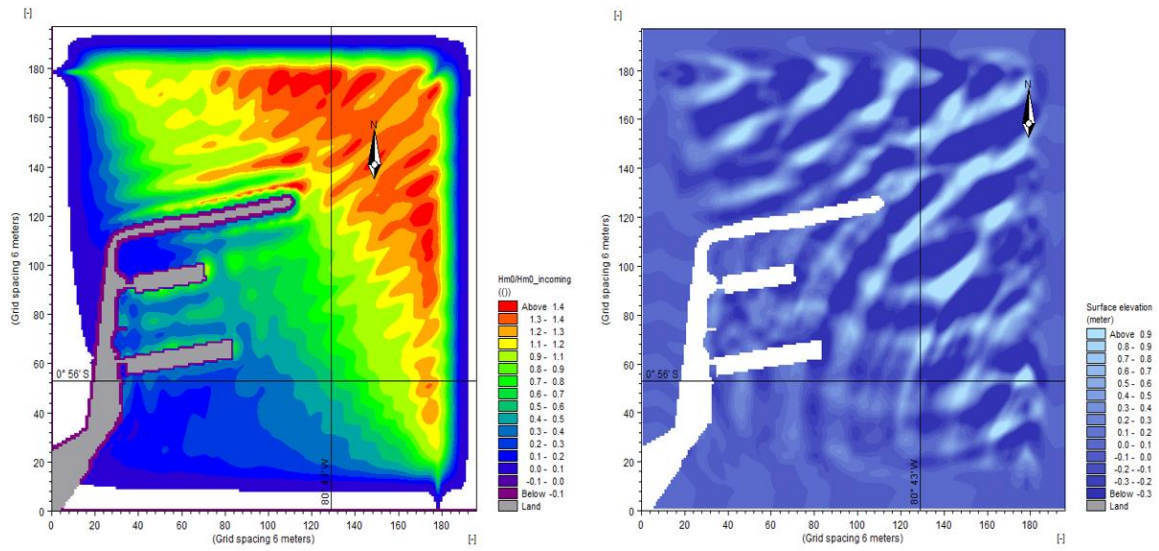


Figura 3.39 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 1: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

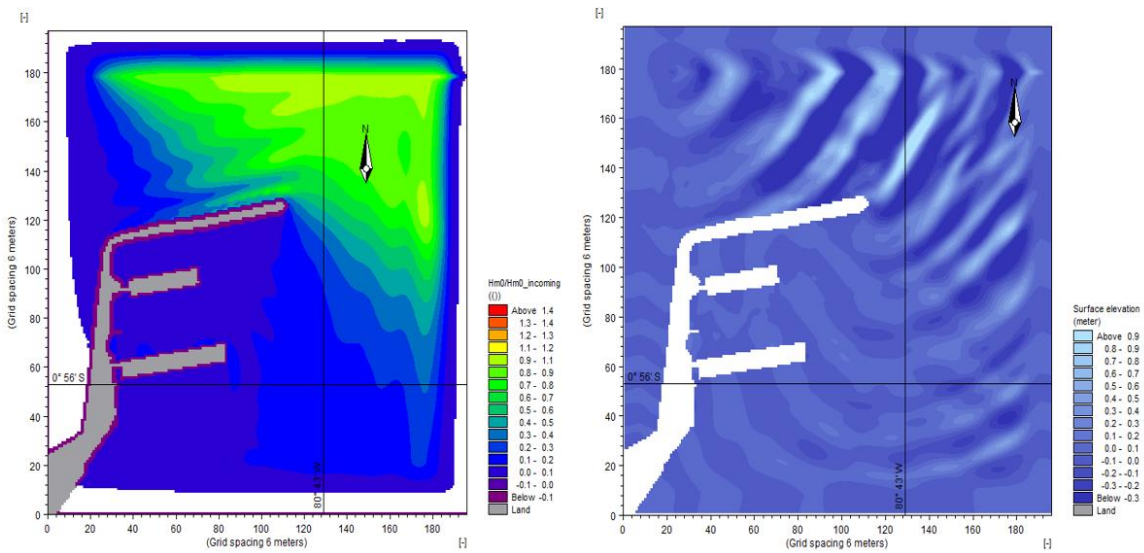


Figura 3.40 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

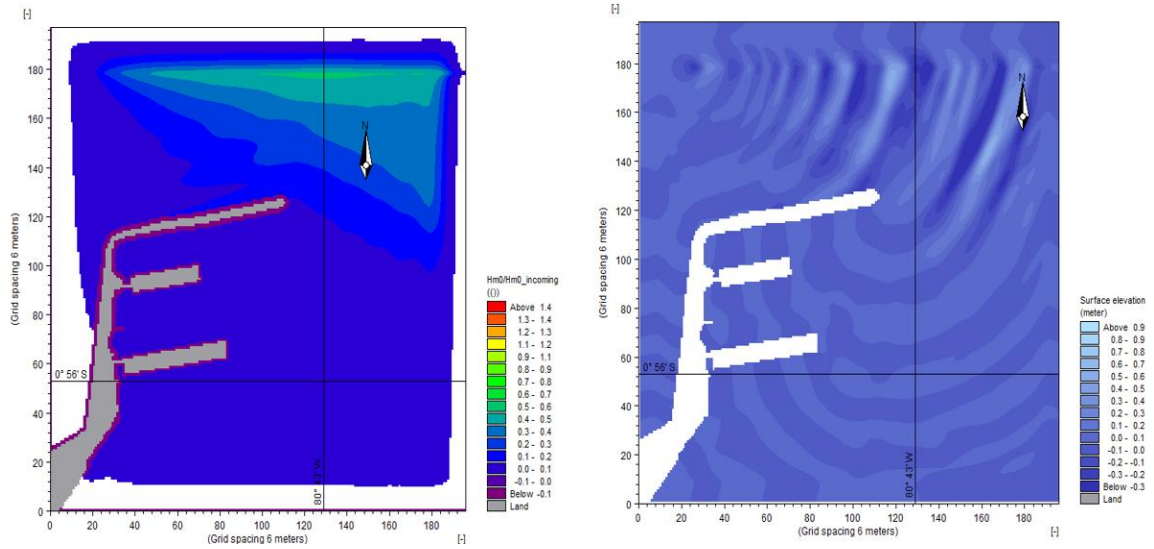


Figura 3.41 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

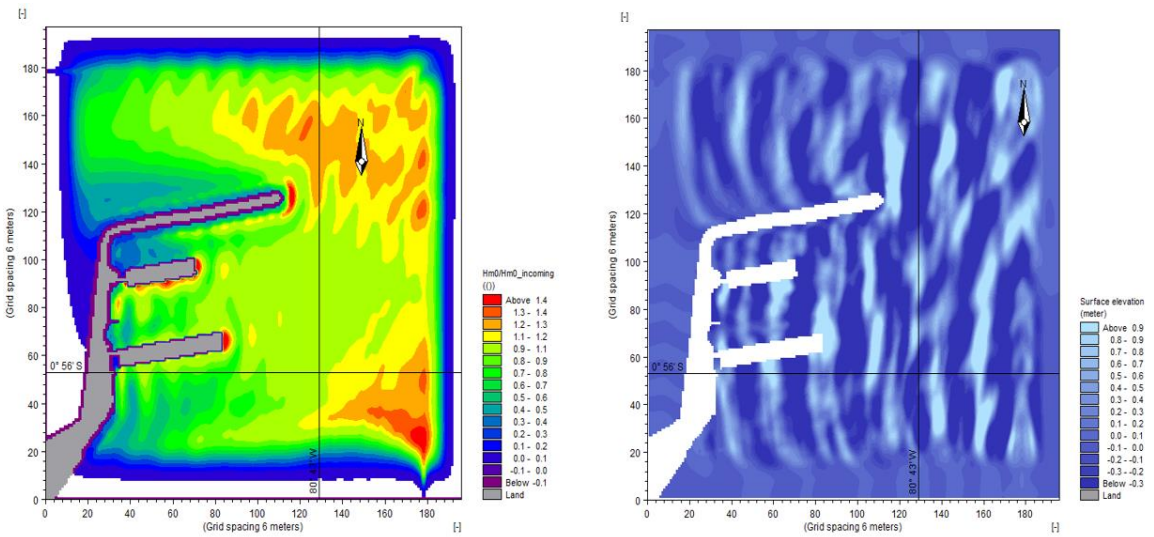


Figura 3.42 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

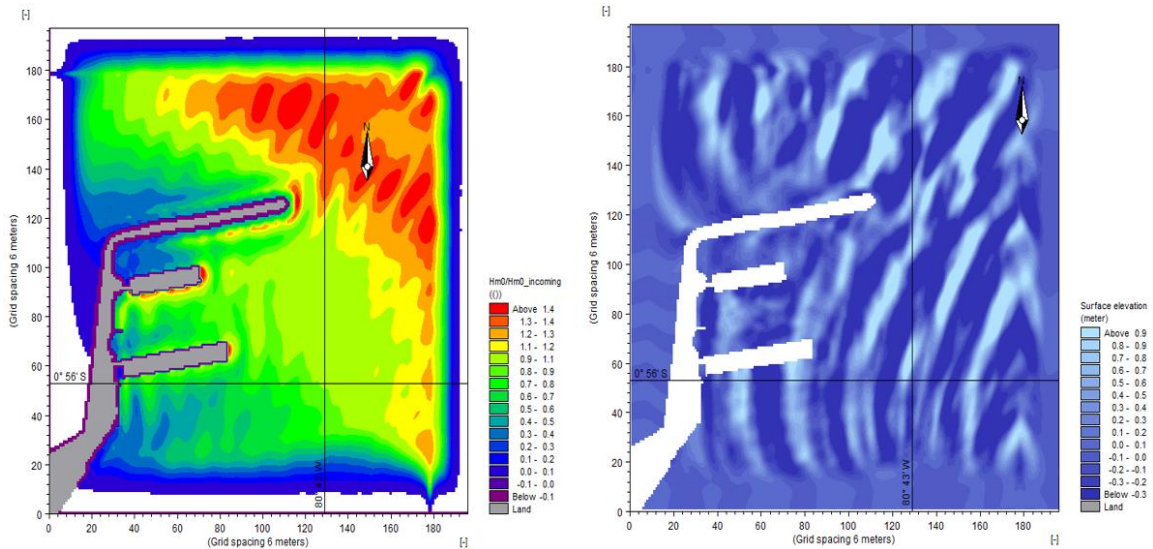


Figura 3.43 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

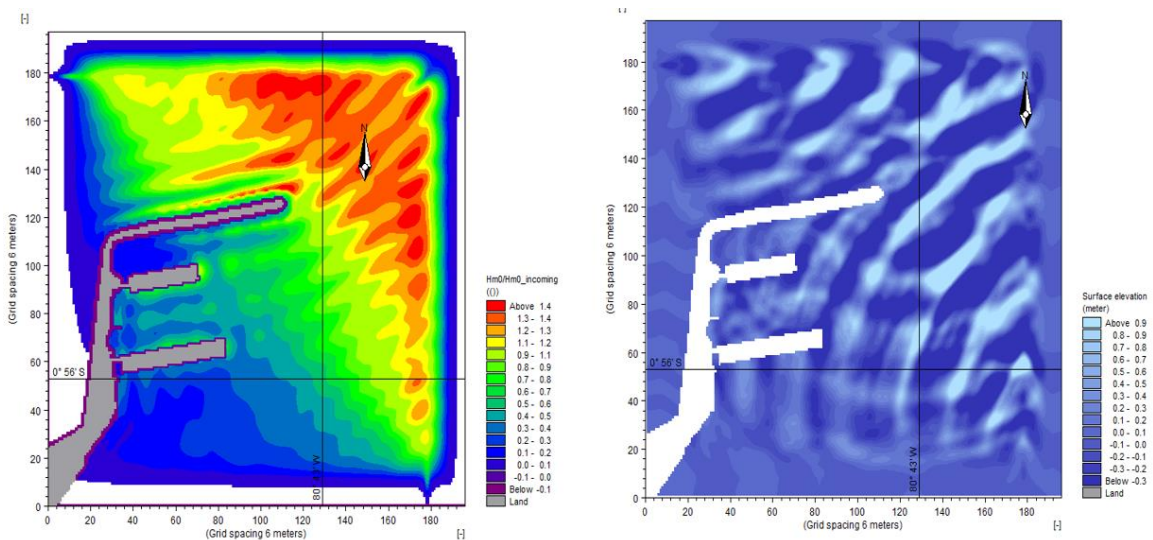


Figura 3.44 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 1: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

A simple vista se observa que las perturbaciones producto del oleaje generado en la dirección de 330° y 360° son mínimas, esto es corroborado con la Tabla 3.9, en donde se indican que los coeficientes de perturbación en estas direcciones son menores al 9%. Por otro lado, en las olas provenientes de los ángulos de 15°, 30° si se observan perturbaciones altas en los muelles. Los niveles máximos de agitación se dan en casi todos atracaderos con un coeficiente de perturbación mayor al 50% en estas direcciones, excepto en el

atracadero 1 para la proyección 2050. El oleaje proveniente de los 60° presenta coeficientes de perturbación entre el 17% y 46%.

Tabla 3.9 Coeficiente de perturbación de olas (%) para los atracaderos de TPM (Caso 1: Proyección 2050 y 2100) (Autoras, 2021)

Dirección	Proyección 2050					Proyección 2100				
	330°	360°	15°	30°	60°	330°	360°	15°	30°	60°
Atracadero 1	3	1	44	31	18	4	1	51	33	17
Atracadero 2	6	1	100	100	46	7	1	100	100	45
Atracadero 3	6	2	57	61	25	9	2	53	62	29
Atracadero 4	3	1	94	80	33	4	1	90	83	39

3.3.3 Oleaje ENSO: rompeolas modificado caso 2

Los resultados presentados desde la Figura 3.45-3.49 muestran un alargamiento 200 m y adicionalmente una extensión del rompeolas de 100 m (Caso 2). A simple vista se observa que el oleaje de 330° y 360° no provoca perturbaciones en los muelles. También se observa que el oleaje desde 330° tiene más alcance al interior de la terminal que el oleaje de 360°. Por otro lado, en las olas provenientes de los ángulos de 15°, 30° y 60° si se observan coeficientes de perturbación altos en los muelles.

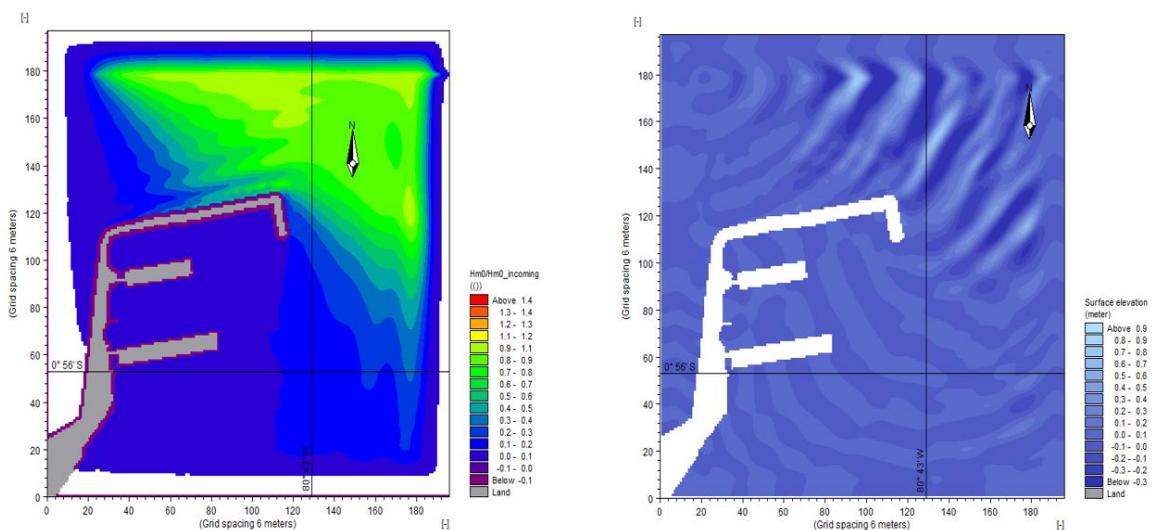


Figura 3.45 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 330° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)

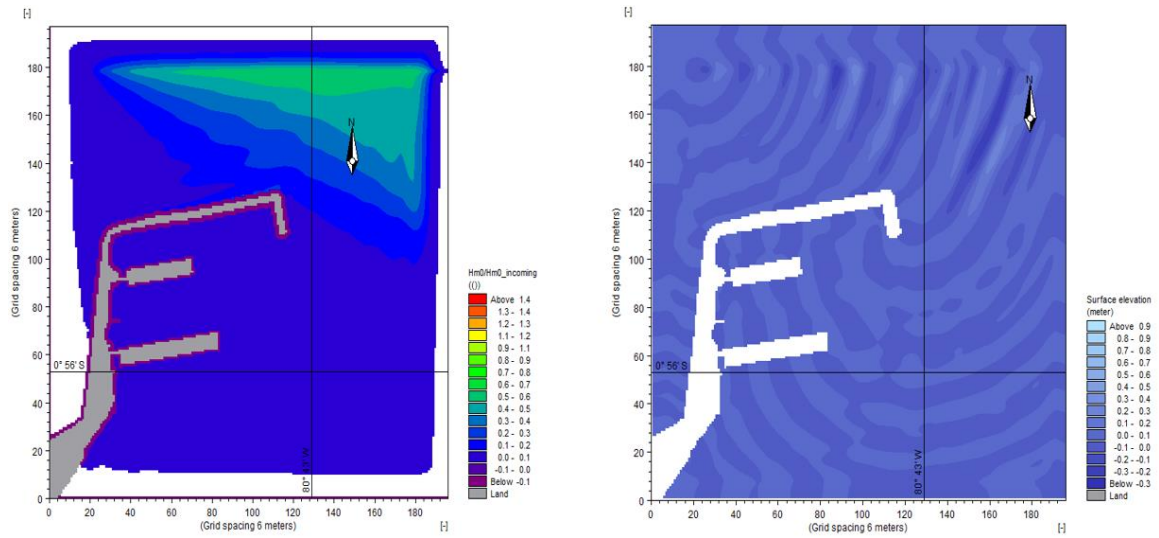


Figura 3.46 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 360° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)

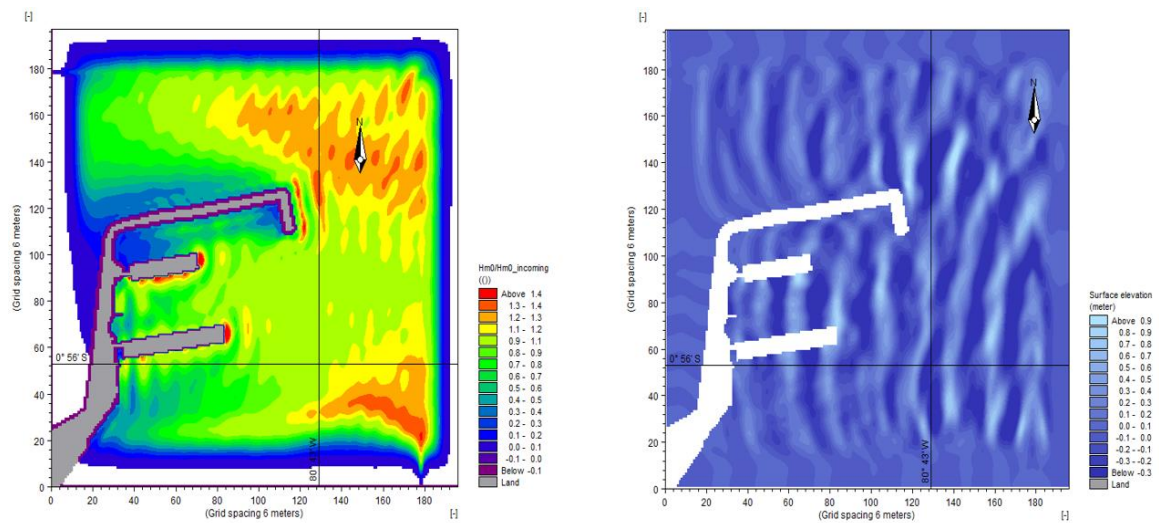


Figura 3.47 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 15° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)

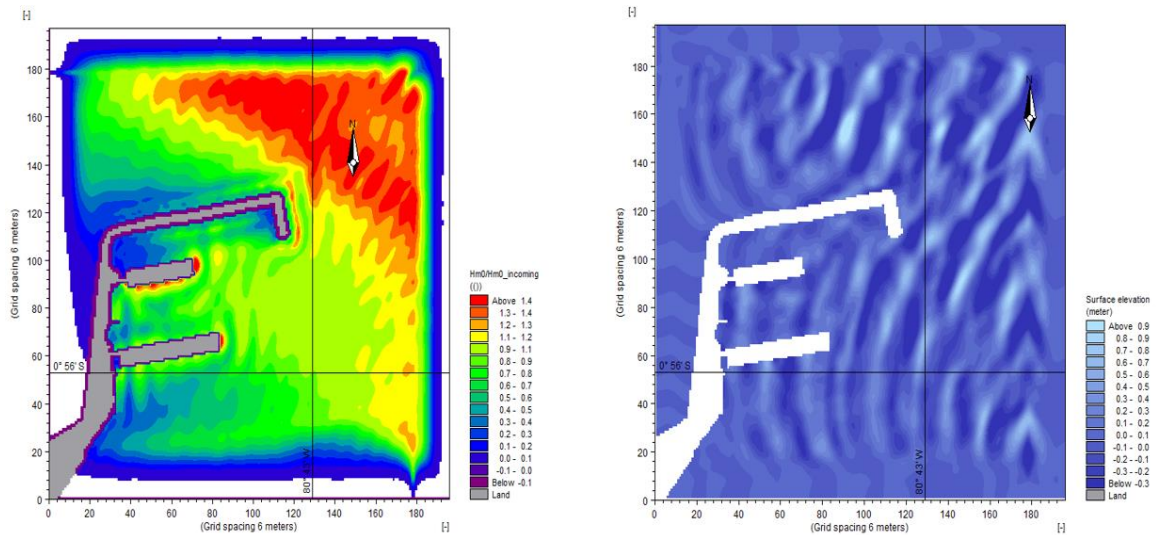


Figura 3.48 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 30° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)

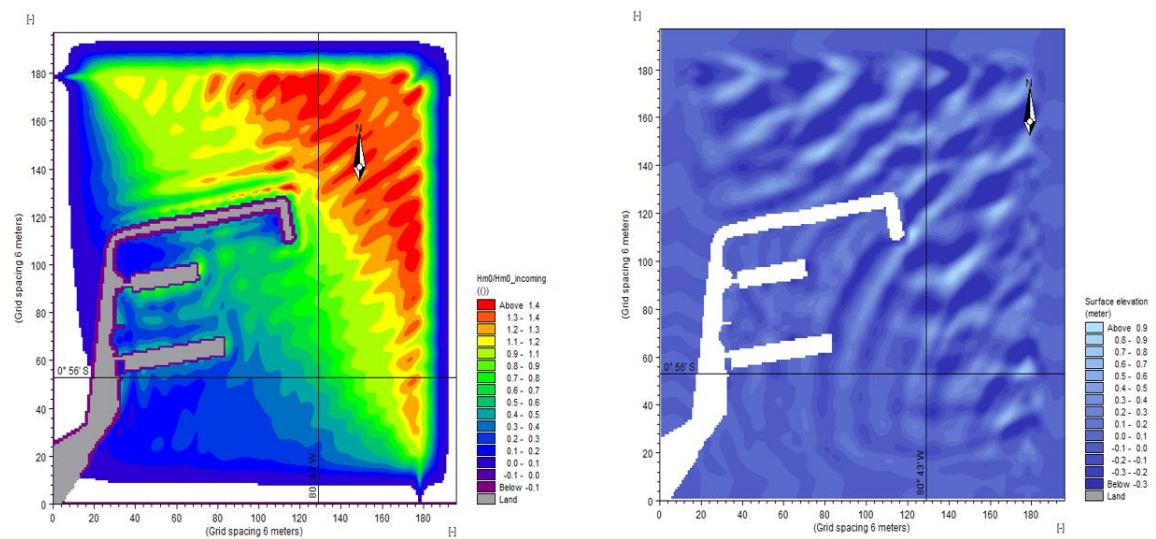


Figura 3.49 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acerca desde 60° (Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)

De acuerdo con la Tabla 3.10, los coeficientes de perturbación que se generan del oleaje en las direcciones 330° y 360° son mínimas, menor al 6%. Los niveles máximos de agitación de olas se encuentran en los atracaderos 2, 3 y 4 con un coeficiente de perturbación mayor al 50% para las direcciones de oleaje de 15° (atracaderos 2, 3 y 4), 30° (atracaderos 2 y 4) y 60° (solo ocurre en el atracadero 2).

**Tabla 3.10 Coeficiente de perturbación de olas (%) en los atracaderos de TPM
(Caso 2: ENSO) (Autoras, 2021)**

Dirección	330°	360°	15°	30°	60°
Atracadero 1	1	1	43	34	21
Atracadero 2	5	1	100	100	52
Atracadero 3	6	2	56	45	19
Atracadero 4	4	1	100	81	32

3.3.4 Oleaje ENSO + cambio climático: rompeolas modificado caso 2

A partir de las características de ola para la proyección 2050 y 2100 anteriormente mencionadas y la modificación del rompeolas (caso 2), se muestra como resultados las Figuras 3.50 - 3.59.

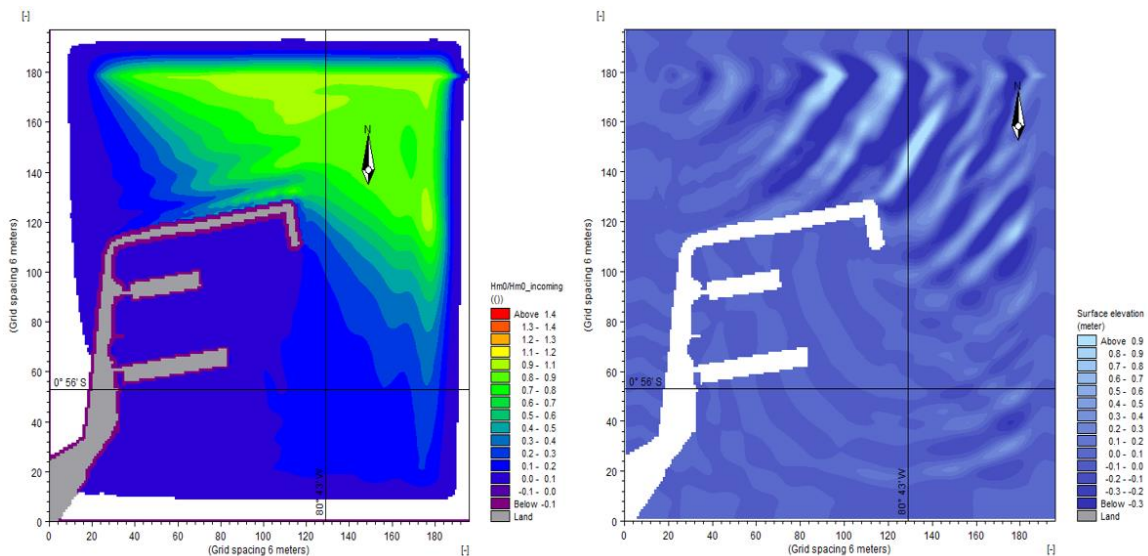


Figura 3.50 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

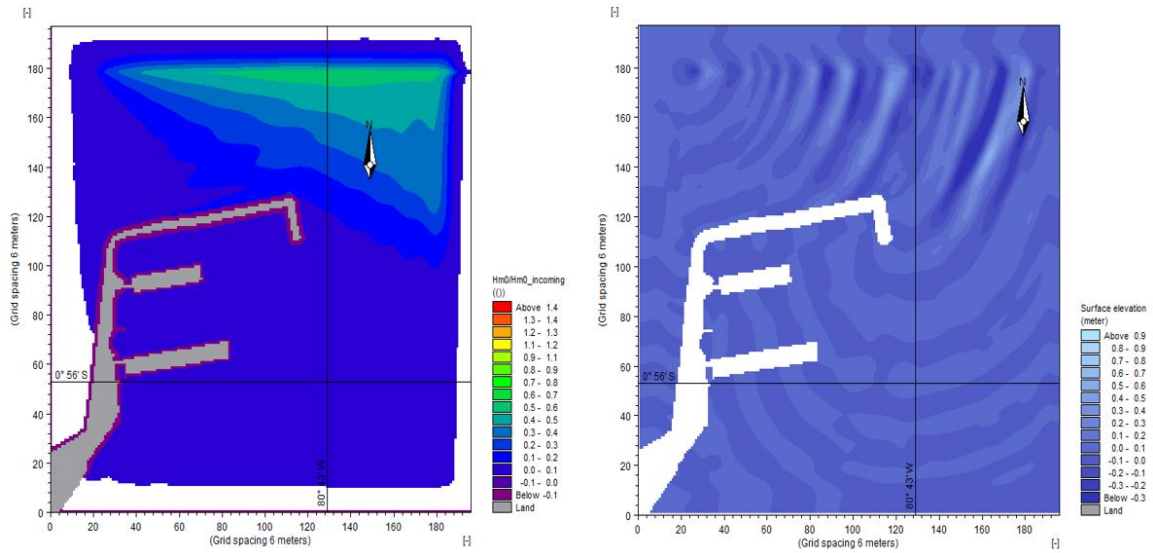


Figura 3.51 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

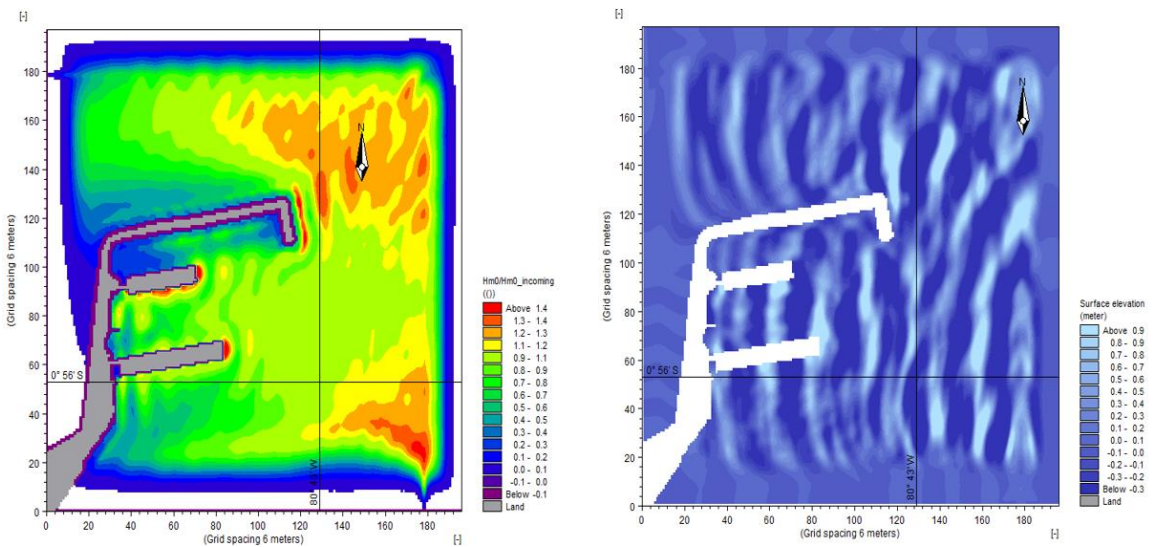


Figura 3.52 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

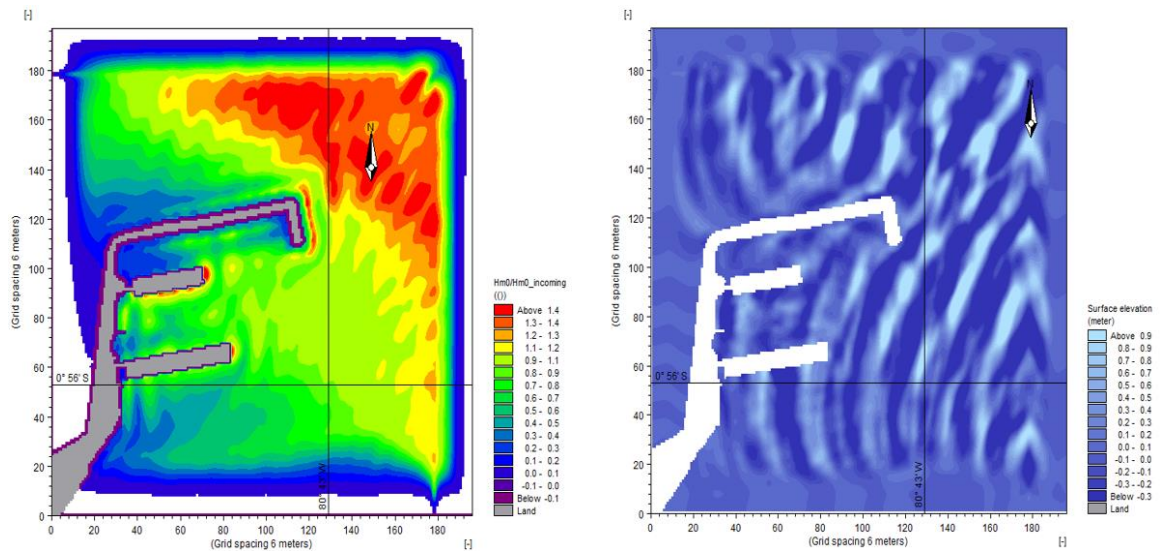


Figura 3.53 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

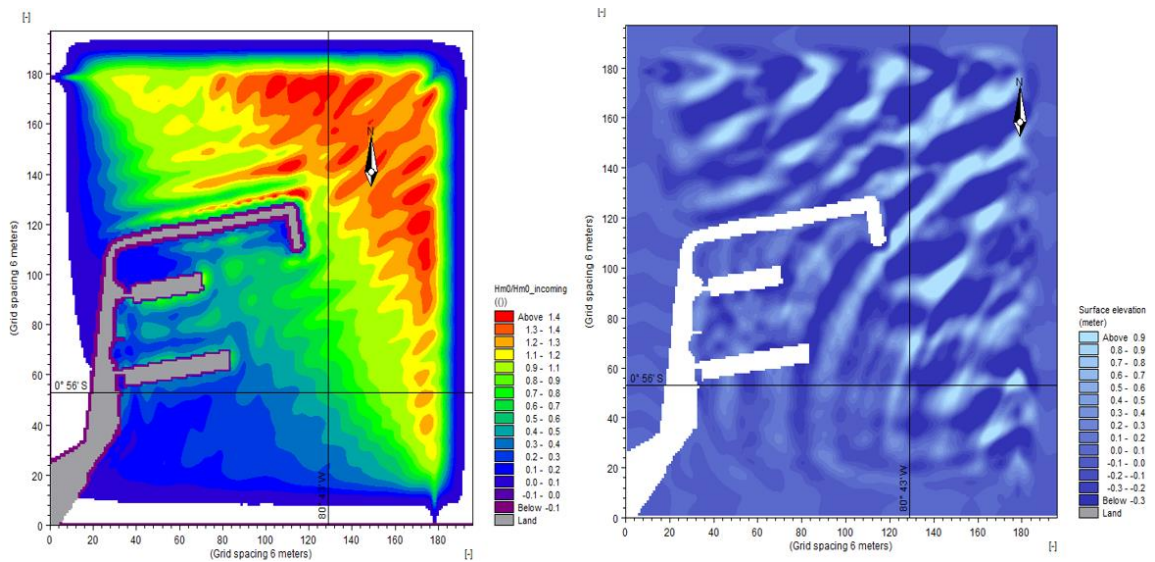


Figura 3.54 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 2: Proyección 2050) (Autoras, 2021)

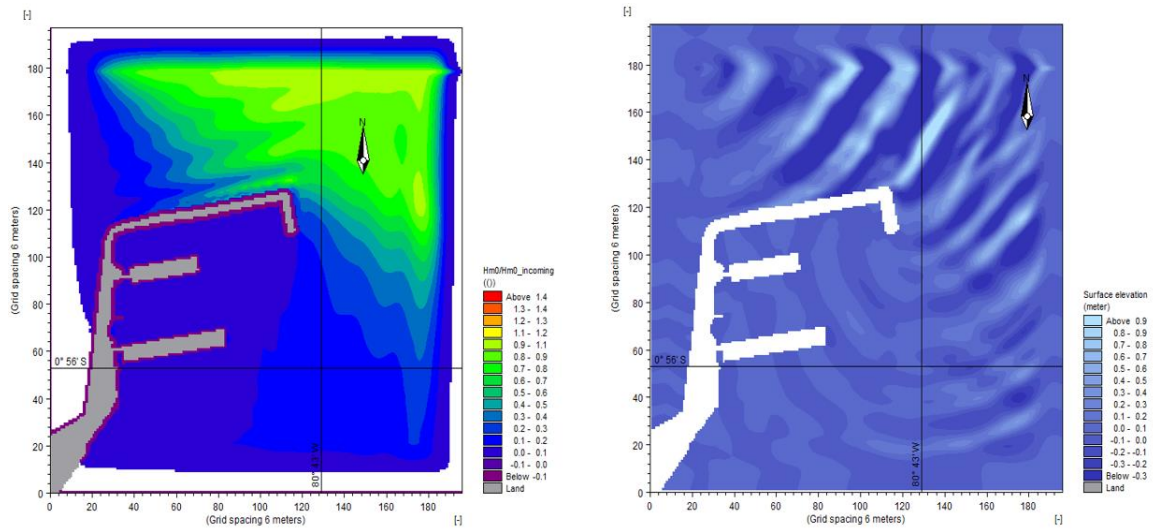


Figura 3.55 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 330° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

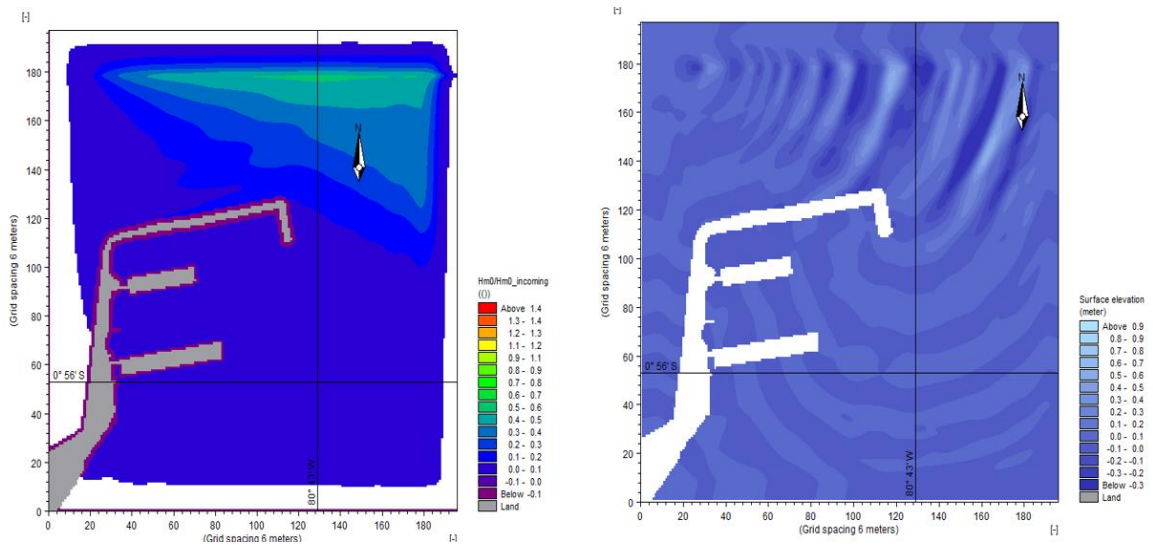


Figura 3.56 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 360° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

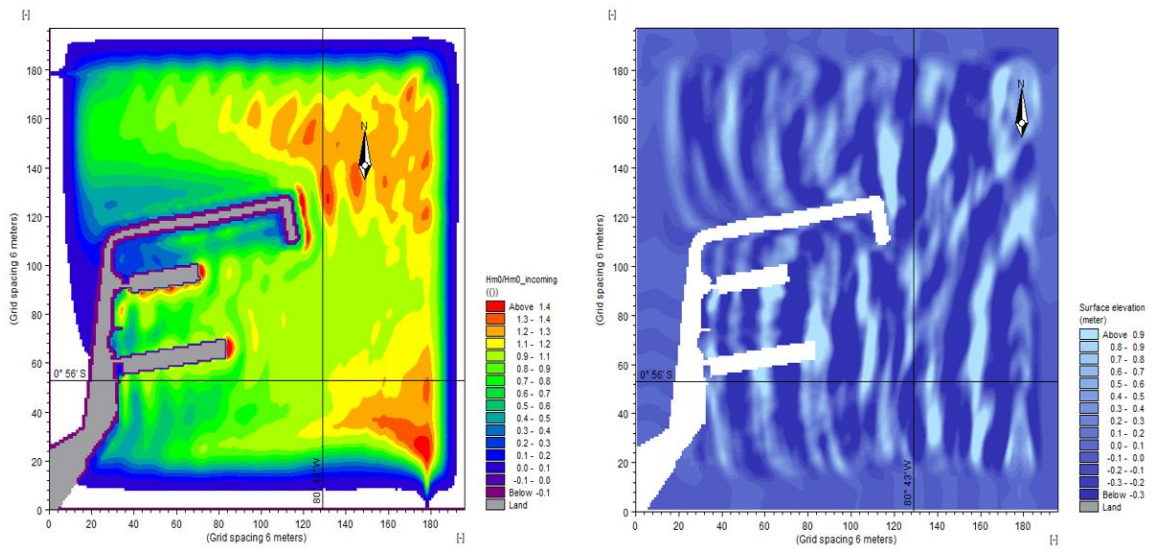


Figura 3.57 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 15° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

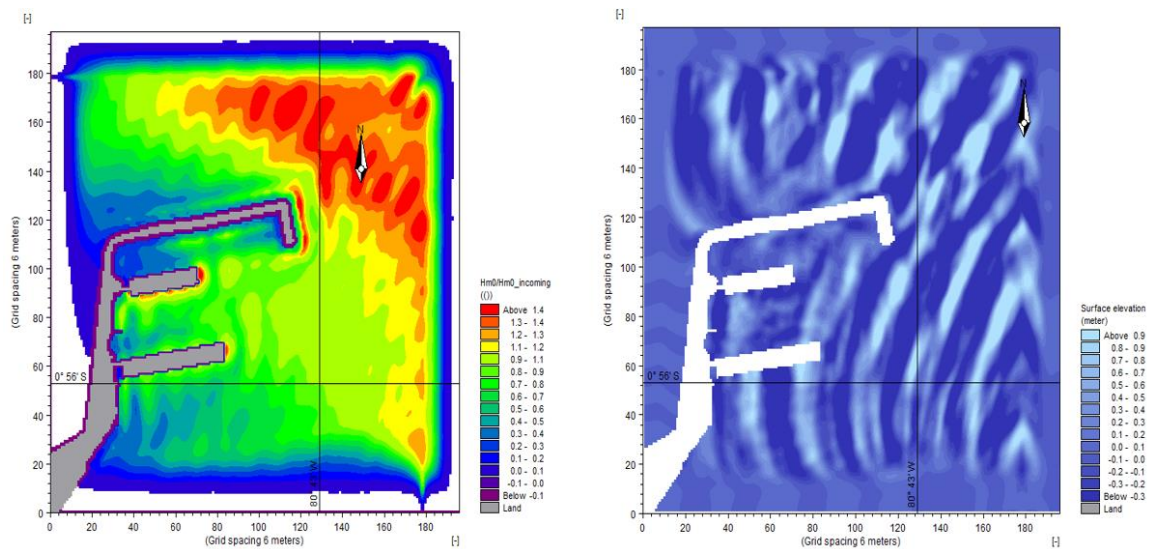


Figura 3.58 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 30° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

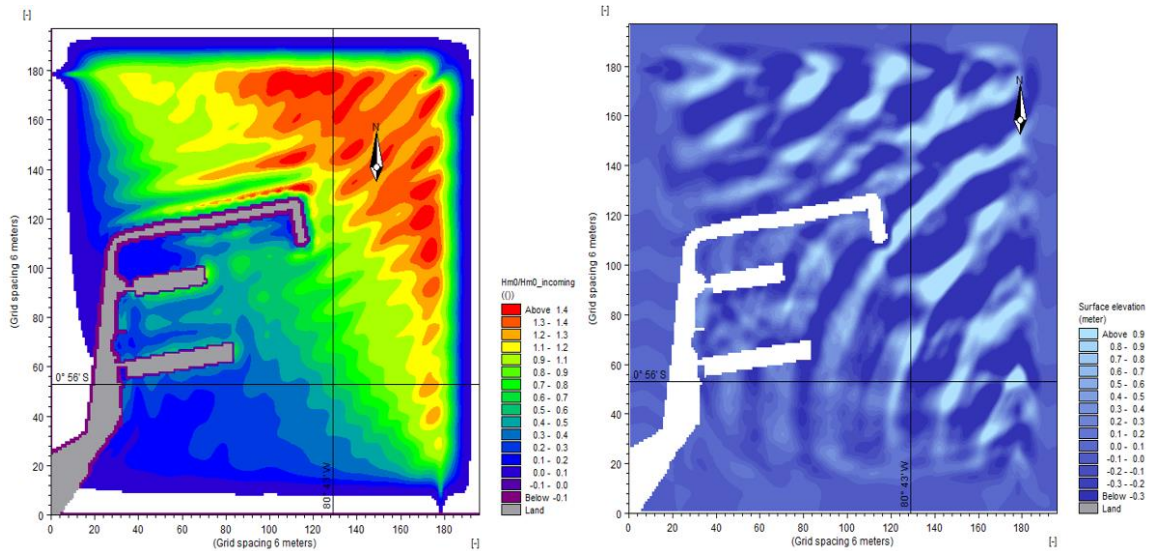


Figura 3.59 Coeficiente de perturbación de olas y patrón de elevación superficial de olas que se acercan desde 60° (Caso 2: Proyección 2100) (Autoras, 2021)

Las perturbaciones producto del oleaje generado en la dirección de 330° y 360° son mínimas, esto es corroborado con la Tabla 3.11, en donde se indican que las perturbaciones en estas direcciones son menores al 7%. El oleaje con dirección de 60° causa coeficientes de perturbación entre el 16% y 44% en ambos muelles. Los niveles máximos de agitación se dan en casi todos atracaderos con un coeficiente de perturbación mayor al 50% en las direcciones 15° y 30° (excepto en el atracadero 1).

Tabla 3.11 Coeficiente de perturbación de olas (%) para los atracaderos de TPM (Caso 2: Proyección 2050 y 2100) (Autoras, 2021)

Dirección	Proyección 2050					Proyección 2100				
	330°	360°	15°	30°	60°	330°	360°	15°	30°	60°
Atracadero 1	1	1	35	28	16	1	1	41	27	15
Atracadero 2	4	1	100	100	44	4	1	100	100	43
Atracadero 3	6	2	66	59	21	7	2	66	59	25
Atracadero 4	3	1	93	77	30	4	1	90	80	35

3.4 Análisis de la ETAPA 6

La Figura 3.60 muestra una comparación del coeficiente de perturbación promedio en los atracaderos para la condición de ENSO 1997-1998 de acuerdo con el estado actual y modificaciones del rompeolas. Se observa que el oleaje

en las direcciones 330° y 360° no causa coeficientes de perturbación mayores al 11%. Dentro de los oleajes en las direcciones de 15° y 30° si se observa una disminución en el coeficiente de perturbación con las modificaciones. Para el caso 1 en la dirección de 15° hay una disminución del 15.75%, mientras que para el caso 2 en esta misma dirección tenemos una disminución del 17%, ambos con respecto al estado actual del rompeolas. Para la dirección de 30°, con el caso 1 hay una disminución del 9% y para el caso 2 hay una disminución del 12.25% respecto al estado actual del rompeolas. En el oleaje de 60° para el caso 1 el coeficiente de perturbación disminuye 8.75%, mientras que para el caso 2 disminuyó 11.75%.

Las Figuras 3.61 y 3.62 corresponden también a una comparación en los coeficientes de perturbación promedio en los atracaderos para las proyecciones 2050 y 2100 respectivamente. De manera general se puede apreciar que sigue el mismo patrón que con la condición de ENSO 1997-1998.

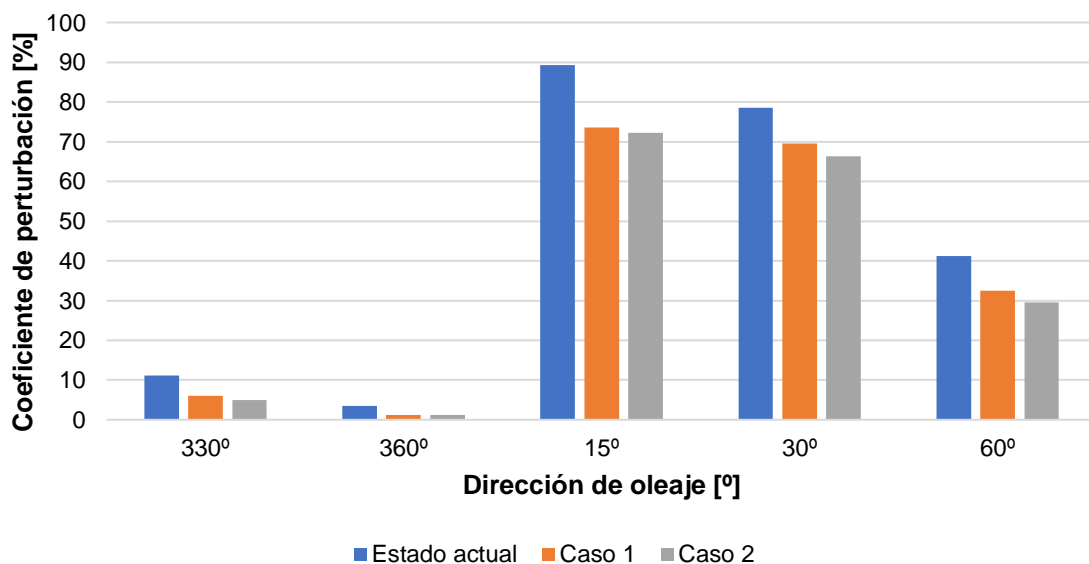


Figura 3.60 Coeficiente de perturbación promedio en los atracaderos - ENSO (Autoras, 2021)

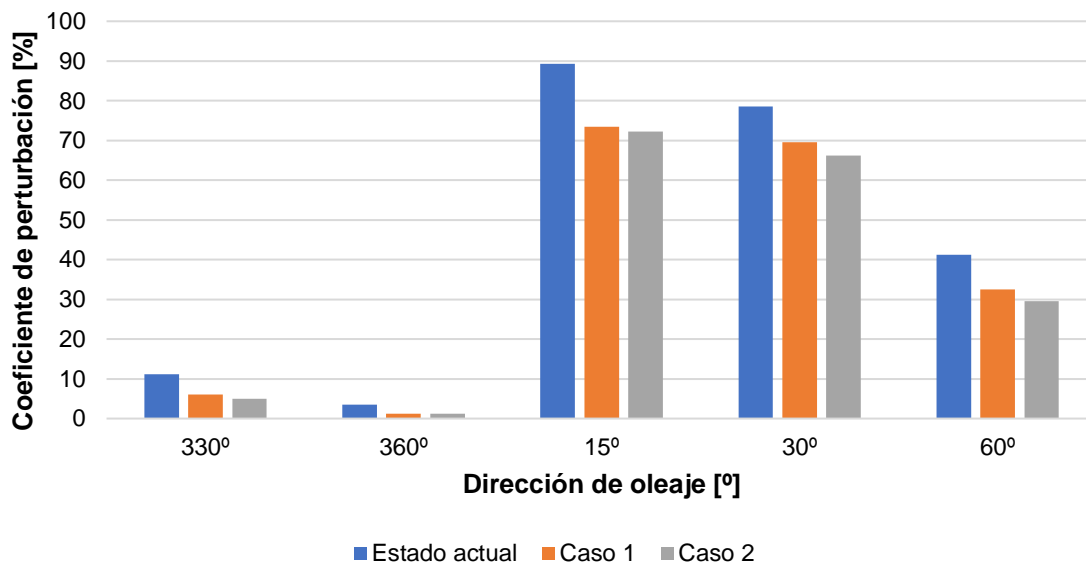


Figura 3.61 Coeficiente de perturbación promedio en los atracaderos - Condición ENSO + Cambio Climático Proyección 2050 (Autoras, 2021)

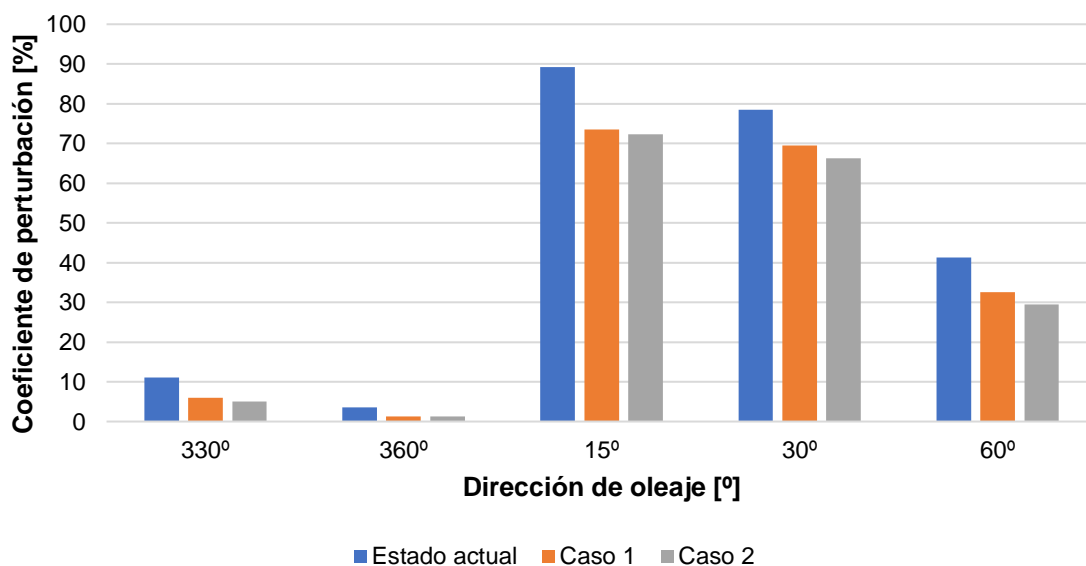


Figura 3.62 Coeficiente de perturbación promedio en los atracaderos - Condición ENSO + Cambio Climático Proyección 2100 (Autoras, 2021)

3.5 Análisis de costos

En la Tabla 3.12 se muestran los costos asociados al presente proyecto. Cabe recalcar que las herramientas mencionadas fueron proporcionadas por la ESPOL, por lo tanto, no nos representó un gasto adquirirlas. Así mismo las cartas náuticas fueron suministradas por el INOCAR bajo ningún costo ya que fueron

utilizadas con fines académicos. En cuanto al equipo utilizado, este pertenece a las estudiantes por lo que no significó un gasto adicional.

**Tabla 3.12 Costos de los insumos utilizados para la realización del proyecto
(Autoras, 2021)**

Tipo	Elemento	Costos	Observaciones
Herramientas	MATLAB	\$20 000	Marca: Mathworks Licencia: 365148
	QGIS	N/A	Esta herramienta es de acceso libre, por lo tanto, no tiene un costo.
	MIKE 21 SW Y BW	\$10 000	Marca: Mike Powered by DHI Licencias: MZ25116-MZ25120
Equipo	Laptop	\$1300	Procesador AMD RYZEN 7 3700U RAM 16 GB Almacenamiento 1 TB SSD Tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 1650Ti
Información	Cartas Náuticas	\$20 c/u \$60 total	Se adquirieron las cartas IOA 103, 104 y 104010. Estas fueron proporcionadas por el INOCAR en formato digital bajo ningún costo ya que fueron utilizadas con fines académicos.
	Datos del WAVEWATCH III	N/A	La información adquirida de este modelo es de acceso libre, por lo tanto, no tiene costo.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La utilización de modelos numéricos computacionales SW y BW nos permiten estudiar la transformación del oleaje desde aguas profundas hasta aguas someras y la agitación de olas dentro de los puertos.
- El modelo SW es adecuado para la transformación de olas en aguas profundas, ya que este describe el oleaje en términos de su periodo, dirección y altura en cada punto del dominio físico. La desventaja de este modelo es que no incluye algunos fenómenos físicos como la difracción y reflexión.
- El modelo BW determinó adecuadamente la perturbación de las olas dentro de los puertos. La desventaja de este módulo es que solo es aplicable en pequeñas áreas costeras.
- Dentro de las limitaciones que se observó en los modelos, se tuvo que eliminar puntos de batimetría y a su vez trabajar con un área menos extensa, ya que el programa tiene establecido un límite permitido de nodos, lo cual condicionó el desempeño de los resultados.
- Este proyecto se enfocó en recrear y analizar un escenario extremo, puesto que por información bibliográfica cuando se tiene la presencia del Fenómeno de El Niño el nivel medio del mar, las alturas de ola y energía incrementan y para 1997-1998 se observan distintas direcciones de olas entre ellas las del norte.
- Las dificultades de recrear el escenario ENSO 1997-1998 es que solo se obtuvo datos puntuales para realizar la comparación con el modelo y no se realizó un análisis estadístico. A partir de esto, y con información obtenida del cambio climático en la provincia de Manabí, se logró realizar un pronóstico para los años 2050 y 2100. Acorde al estudio Contreras et al. (2014), la calidad de los datos del nivel del mar fueron graficadas en su evolución temporal, donde se eliminaron datos erróneos y la serie de oleaje no presentaron errores.

- Los resultados obtenidos para la validación del modelo SW se ajustaron muy bien a la información bibliográfica recolectada para las condiciones ENSO. Se evidenció que las variables de calibración más sensibles son la rugosidad de fondo puesto que, al incrementar esta variable conduce a mayor disipación de energía, es decir; disminución de la altura de ola y aumento del periodo; y la formulación espectral, ya que dependiendo de cual se utilizó puede generar una sobrestimación de los resultados.
- Los resultados obtenidos de la validación del BW se ajustaron bien al método teórico de diagramas de difracción. La herramienta QGIS jugó un papel importante en esta etapa. Se evidenció que los parámetros más sensibles en la calibración del modelo BW fueron la onda interna y la capa de esponja. La correcta configuración de estos permitió un mejor ajuste del modelo. De la misma manera, la rugosidad de fondo y viscosidad de Eddy fueron parámetros relevantes en esta etapa.
- Con respecto al cambio climático se observa un incremento en la de altura significativa registrada en el componente bibliográfico de 0.73 m del 2050 al 2100, pero no se realizó cambios en el periodo pico ni dirección media de ola en el SW; sin embargo, si se existe una tasa de cambio anual de 0.29° S/año para la dirección de ola en la provincia de Manabí (Contreras et al., 2014).
- Los ángulos que inciden sobre el rompeolas corresponden al 67% de ocurrencia con el rango de 300°-330° y del 2% de ocurrencia se dan en el rango de 1°-30°, siendo este último rango el que mayor agitación causa dentro del puerto.
- Para el evento ENSO 1997-1998 en el estado actual del rompeolas, los niveles máximos de agitación se dan con el oleaje proveniente en las direcciones de 15° y 30°, con menores porcentaje de agitación le sigue la dirección de 60°. Finalmente, para el oleaje con dirección de 330° y 360° las perturbaciones son mínimas.
- En las condiciones de cambio climático para el estado actual, se observaron mayores niveles de agitación por el aumento del nivel del mar y altura de ola. Por otra parte, estos niveles de agitación abarcaban mayor área.

- Teniendo en consideración el incremento de agitación para las proyecciones 2050 y 2100, se procedió a modificar el rompeolas para analizar los niveles de agitación.
- Los resultados con modificaciones mantuvieron el mismo patrón que en el estado actual, esto se refiere a que los niveles máximos de agitación se presentaron con el oleaje proveniente en las direcciones de 15° y 30° y que con el oleaje con dirección de 330° y 360° las perturbaciones son mínimas. Sin embargo, al realizar estas modificaciones, los resultados si mostraron reducción del coeficiente de perturbación con respecto al estado actual del rompeolas.
- Se obtuvieron alturas significativas que sobrepasan el valor de 0.5 m, siendo este el valor de altura máxima para que se pueda realizar operación de carga a los diferentes buques que la TPM recibe. Dicho esto, al tener alturas mayores al valor de referencia anteriormente mencionado puede ocasionar que se produzcan pérdidas económicas que están alrededor de \$5000 a \$10 000 por buque, si es que esté ya no ingresa a muelle.
- Con las proyecciones de cambio climático mostradas damos paso a que los planificadores portuarios de TPM puedan tomar acciones con respecto a las modificaciones del rompeolas, puesto que se espera que para el 2100 los efectos provocados por el cambio climático generen pérdidas económicas que asciendan a 27 billones de dólares al año a nivel mundial (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y Desarrollo, 2020).
- De acuerdo con las conversaciones realizadas con el cliente, se concluyó que el caso 2 no sería una opción viable, debido a que puede generar inconvenientes en la navegación y maniobra de los buques.

4.2 Recomendaciones

- La validación de los resultados se realizó con información bibliográfica, pero es importante contar con una base de mediciones in situ de las características de oleaje más amplia, en el que se pueda hacer un filtrado de datos y una comparación más exacta.

- Al momento de la corrida de los modelos numéricos, si se quiere ser más preciso con los resultados, es decir trabajar con una mayor resolución, ampliar más el área de estudio y corridas más rápidas que reduzca en tiempo, dinero y mejore la eficiencia, es recomendable utilizar simulaciones basadas en la nube como la plataforma de Microsoft Azure o que la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar, pueda proporcionar a los estudiantes computadoras con mayor capacidad que puedan soportar corridas extensas.
- Actualizar las licencias de MIKE Zero y MIKE 21 para que así en los módulos que se trabajó se pueda utilizar una malla más extensa y no se tenga problema por el exceso de nodos, ya que en el caso de BW, se disminuyó la resolución de la batimetría y se eliminó puntos de profundidad para que se alcanzé el número de nodos permitido por la licencia.
- Continuar con este proyecto, con la utilización del módulo de análisis de amarre de MIKE 21 (Mooring analysis), ya que, con los archivos de salida generados, se podría obtener simulaciones de como los sistemas de amarre y el buque se verían afectados ante estas condiciones extremas.
- A partir de los resultados obtenidos, realizar un estudio morfodinámico (MIKE 21 FM HD ST), ya que las modificaciones del rompeolas implicarían alteraciones al suelo marino y al transporte sedimentario.
- Tomar en consideración la afectación a la navegabilidad que puede causar al realizar modificaciones en la infraestructura del puerto.

BIBLIOGRAFÍA

- Allauca, S., & Cardin, V. (1987). Análisis de las olas en la costa central del Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 4.
- APM. (2014). *Reglamento de Operaciones*. Manta: Autoridad Portuaria de Manta.
- APM. (2020). *Boletín Estadístico Portuario*. Manta: Autoridad Portuaria de Manta
- Basco, D. (2001). *Functional Design: Coastal Structures*. Virginia: The Coastal Engineering Center.
- Benedicto, M., & Alonso, M. (2013). *Anteproyecto para el Desarrollo del puerto de aguas profundas de Manta*. Manta: Ministerio de Transporte y Obras Públicas & Ineco PROES.
- Berrones, M., Chunga, K., Lucero, M., Ordoñez, V., & Quinde, W. (2014). *Estudio de Impacto Ambiental para la construcción, operación y mantenimiento del muelle de la empresa Industria de enlatados alimenticios*. Jaramijo: IDEAL CIA. LTDA.
- Cartaya, S., Zurita, S., & Montalvo, V. (s.f.). *Métodos de ajuste y homogenización de datos climáticos para detemrinar el índice de humedad de Lang en la provincia de Manabí, Ecuador*. Obtenido de Revista de las Agrociencias: https://revistas.utm.edu.ec/index.php/latecnica/16_pag_94_106
- CEPAL; Universidad de Cantabria; Ministerio de Ambiente y Medio Rural y Marino; Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación. (2011). *Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Chamorro, G. (2016). *Modelización Numérica de los Fenómenos de Propagación del Oleaje. Aplicación del Método de los Elementos Finitos a la Ecuación de la Pendiente Suave (Mild-Slope Equation)*. Sevilla: Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería. Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Sevilla.
- Chiriguaya, J. (1989). *Aspectos teoricos sobre ondas internas*. Guayaquil: INOCAR.

- Coastal Engineering Research Center. (1984). *Shore Protection Manual*. Vicksburg, Mississippi: U.S. Government Printing Office.
- Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y Desarrollo. (2020). *Adaptación del cambio climático de los puertos marítimos en apoyo de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Ginebra: Naciones Unidas.
- Consulsua. (2017). *Estudio de Impacto Ambiental para la Construcción y Operación de la Terminal Internacional del Puerto de Manta Fase 1A-1B*. Manta: Consulsua.
- Contreras, M., Cevallos, J., Erazo, T., Alday, M., & Mizobe, C. (2014). *Cambio y variabilidad climática contemporáneos en la costa de Manabí, Ecuador*. Ecuador: La Técnica.
- Deltares. (2018). *Non-hydrostatic wave modelling with improved dispersive behavior*. Delft.
- Díaz, G. (2006). *ANÁLISIS DE RESONANCIA PORTUARIA: GENERACIÓN, TRANSITORIEDAD, NO LINEALIDAD Y ACOPLAMIENTO GEOMÉTRICO*. CANTABRIA: UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS .
- Flores, J. (2008). *Propagación del oleaje*. Madrid: Universidad Alfonso X el Sabio. Ingeniería de Caminos. Ingeniería Marítima y Costera.
- Fontirroig, H. (2004). *Calibración del canal de oleaje CIEM para un ensayo de estabilidad de dique en talud*. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña.
- García, A. (2018). *Diseño Hidráulico y Estructural de Obras de Protección frente a Erosión e Inundaciones del Río Balsayacu en el Centro Poblado de Balsayacu, Distrito de Campanilla, Provincia de Mariscal Cáceres-Región San Martín*. Tarapoto: Universidad Nacional de San Martín.
- González, E. (2018). *Estudio del sistema portuario y del sector pesquero en Ecuador. Propuesta de ordenamiento del Puerto de Manta (provincia de Manabí)*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Guisado, E., Malvarez, G., & Navas, F. (2010). *Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinámica y las TIG*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.

- Holthuijsen, L. (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*. New York: Cambridge University Press.
- INOCAR. (2005). *Derrotero de la costa continental e insular del Ecuador*. Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada.
- INOCAR. (2010). *Temperatura Superficial del Mar*. Obtenido de Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada : <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/productos/temperatura-superficial-del-mar>
- Locarnini, R., Mishonov, A., Antonov, J., Boyer, T., & Garcia, H. (2006). World Ocean Atlas 2005. En *Volume 1: Temperature*. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 61 (pág. 182). Washington D.C: U.S. Gov. Printing Office.
- Manson, G. (2012). *Configuration of MIKE 21 for the Simulation of Nearshore Storm Wves, Currents and Sediment Transport: Brackley Bight, Prince Edward Island*. Canada: Natural Resources Canada.
- MIKE Powered by DHI. (2021). *MIKE Powered by DHI*. Obtenido de MIKE 21 Spectral Wave: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE21SW.pdf
- MIKE Powered by DHI. (2021). *MIKE Powered by DHI*. Obtenido de MIKE 21 Boussinesq Wave: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Coast_and_Sea/MIKE21BW.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador. (s.f de s.f de 2008). *Descripción del viento y oleaje*. Obtenido de Ministerio de Medio Ambiente: <https://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/seccion+educativa/descripcion+del+viento+y+oleaje/>
- Ministerio de Salud Pública. (2016). *El Fenómeno El Niño en Ecuador*. Ministerio de Salud Pública-Organización Panamericana de la Salud.
- Ministerio de Transporte y Obras Publicas. (2019). *Estadísticas Portuarias y de Transporte Marítimo*. Guayaquil: Subsecretaria de Puerto y Transporte Marítimo y Fluvial.
- Modelo WAVEWATCH III*. (2017). Obtenido de Interacción Océano Atmósfera físicoquímica de la atmósfera:

ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/informacion-de-modelos/63-wavewatch

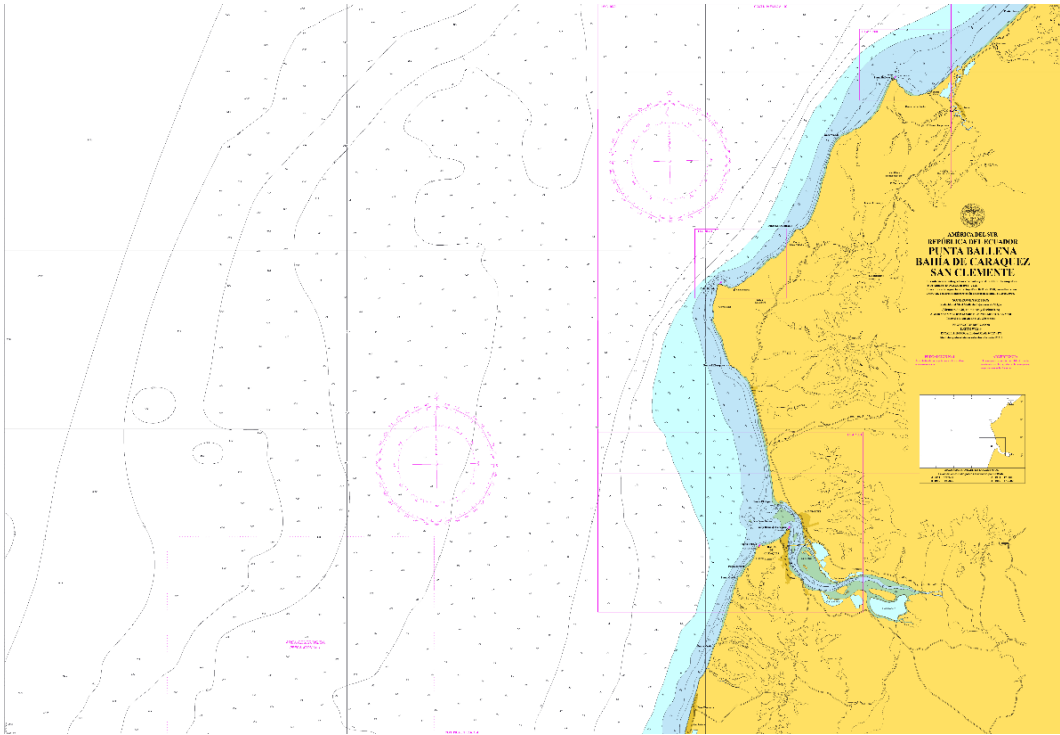
- MTOP & APM. (2018). *Reporte de Evaluación de Impacto Ambiental y Social para la Reconstrucción y Ampliación del Terminal Pesquero y de Cabotaje de la Ciudad de Manta, Provincia de Manabí*. Manta.
- NOAA. (s.f.). *Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures*. Obtenido de National Centers For Environmental Information: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>
- NOAA. (s.f.). *Temperaturas de la superficie del mar del Pacífico ecuatorial*. Obtenido de National Centers for Environmental Information: <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/sst/>
- Panigrahi, J., Padhy, C., & Murty, A. (2015). Inner harbour wave agitation using boussinesq wave model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7.
- Pecher, A., & Kofoed, J. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. Aalborg: Springer International Publishing AG Switzerland.
- Pinto, E. (2016). *Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada*. Obtenido de El Niño, La Niña, ENSO, ENOS, El Niño Modoki, El Niño Canónico, El Niño Extraordinario, El Niño Godzilla, El Niño Costero, El Niño Oriental ¿En qué consisten realmente y cómo afectan al Ecuador?: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/articulos/770-el-nino-la-nina-enso-enos-el-nino-modoki-el-nino-canonical-el-nino-extraordinario-el-nino-godzilla-el-nino-costero-el-nino-oriental-en-que-consisten-realmente-y-como-afectan-al-ecuador>
- Sañudo, T. (2016). *Estudio de la difracción en modelos de propagación del oleaje*. Santander: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.
- Soledispa, B. (2009). *Estudio de las características sedimentológicas de la zona costera frente al balneario de Manta, Ecuador*. Guayaquil: Acta Oceanográfica del Pacífico.
- TPM. (24 de Mayo de 2020). *Dos años en el puerto de Manta*. Obtenido de Terminal Portuaria de Manta: <http://tpm.ec/dos-anos-en-el-puerto-de-manta>

- Vera, L. (2000). Régimen de oleaje en la zona de Jaramijó y Salinas. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, 29-35.
- Vera, L., Lucero, M., & Mindiola, M. (2009). Caracterización oceanográfica de la costa central ecuatoriana entre la Punta del Morro y Jaramijó, Ecuador. *Acta Oceanográfica del Pacífico*.
- WAVEWATCH III. (2019). Datos de altura significativa, periodo y dirección de ola, velocidad y dirección de viento. Obtenido de National Weather Service : <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>

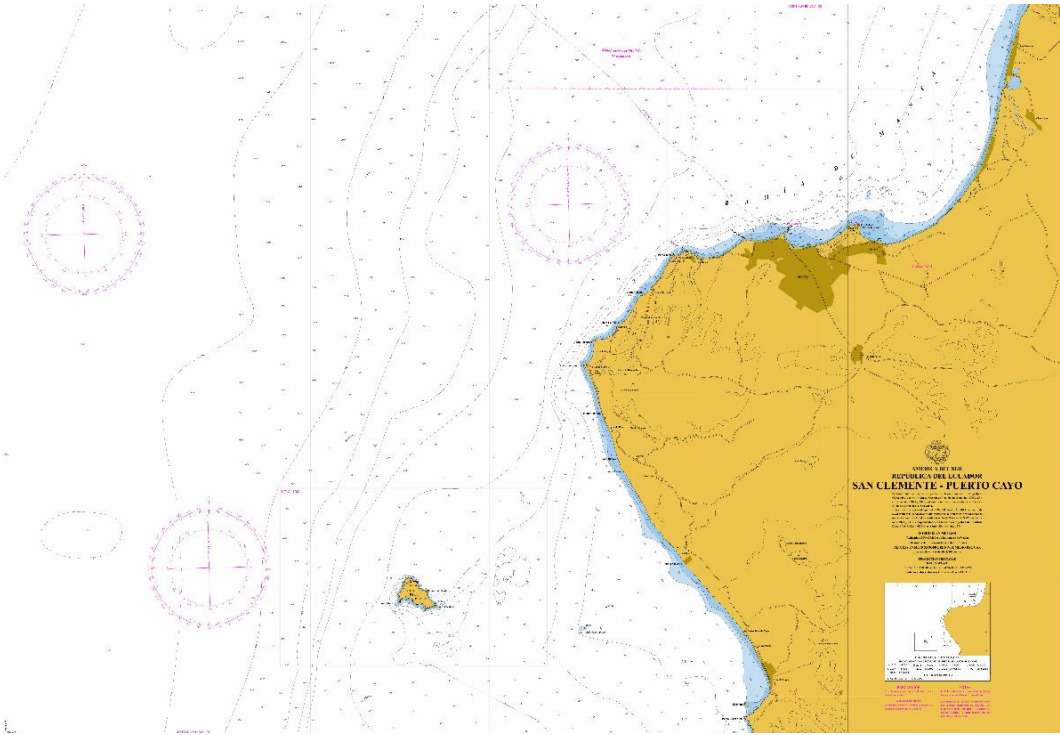
APÉNDICES

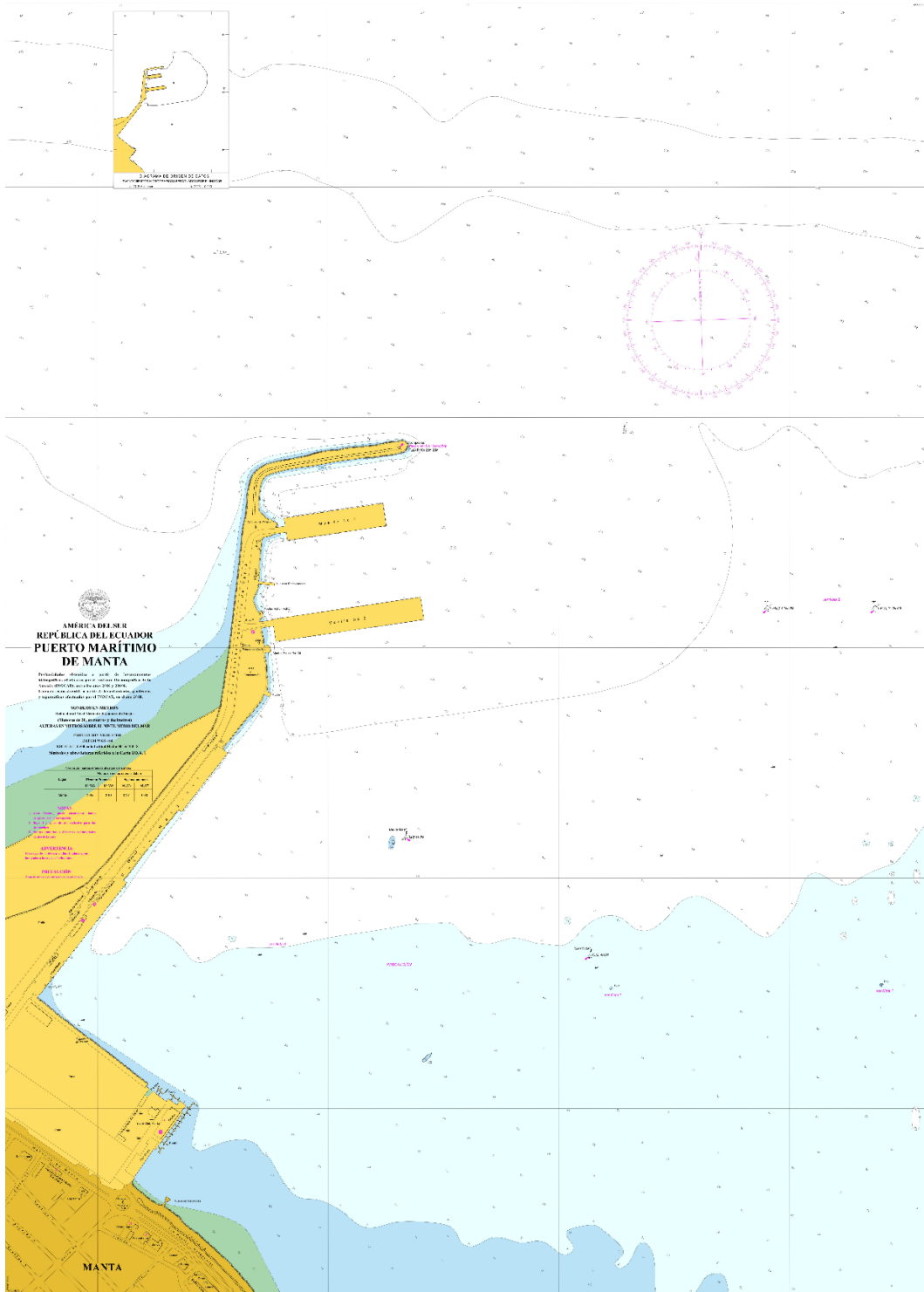
Apéndice A

IOA 103



IOA 104





Apéndice B

Código de MATLAB para la descarga de datos del WAVEWATCH III

```
link='http://apdrc.soest.hawaii.edu:80/dods/public_data/Model_output/WAVEWATCH_III/3hourly';
```

```
% atributos  
ncdisp(link);
```

```
% longitud, latitud  
lo=ncread(link,'lon');  
la=ncread(link,'lat');  
[lom,lam]=meshgrid(lo,la);
```

```
lom=reshape(lom,157*288,1); %157*288 es el número de filas, 1 número de columnas  
lam=reshape(lam,157*288,1);
```

```
tim=ncread(link,'time');  
tim2=udunits2datetime(tim,'days since 1-1-1 00:00:0.0');
```

```
coastmap([277,283,-5,2],'nofill',1), hold on,  
plot(lom,lam,'r*');
```

```
% Ubicación de la posición del punto de grilla  
ixlo=find(lo==278.75);  
ixla=find(la==0);
```

```
%Obtención de datos de velocidad y dirección del viento  
uu=ncread(link,'ugrdsfc',[224,79,1],[1,1,Inf]);  
uu=squeeze(uu);  
vv=ncread(link,'vgrdsfc',[224,79,1],[1,1,Inf]);  
vv=squeeze(vv);
```

```
ww=sqrt(uu.^2+vv.^2);  
wwdir=atan2d(vv,uu);  
wwdir=wwdir+180;
```

```
%Obtención del gráfico de viento  
Options = {'anglenorth',0,'angleeast',90,'labels',{'N (0°)', 'E (90°)', 'S(180°)', 'W(270°)'}, 'freqlabelangle',45,'cmap','invjet','lablegend','Velocidad de Viento [m/s]','TitleString',{'Rosa de viento','Posición de la boya [278.75,0]','Período: 1997-2019'}};
```

```
[figure_handle,count,speeds,directions,Table] = WindRose(wwdir,ww,Options);
```

```
%Obtención de datos de oleaje  
% Dirección  
w_theta=ncread(link,'dirpwsfc',[224,79,1],[1,1,Inf]);
```

```

w_theta=squeeze(w_theta);
ixdir=find(w_theta>360 | w_theta<0);
w_theta(ixdir)=NaN;

% altura significativa
w_hsig=ncread(link,'htsgwsfc',[224,79,1],[1,1,Inf]);
w_hsig=squeeze(w_hsig);
ixhsig=find(w_hsig>5 | w_hsig<0);
w_hsig(ixhsig)=NaN;

% período
w_per=ncread(link,'perpwsfc',[224,79,1],[1,1,Inf]);
w_per=squeeze(w_per);
ixper=find(w_per>25 | w_per<0);
w_per(ixper)=NaN;

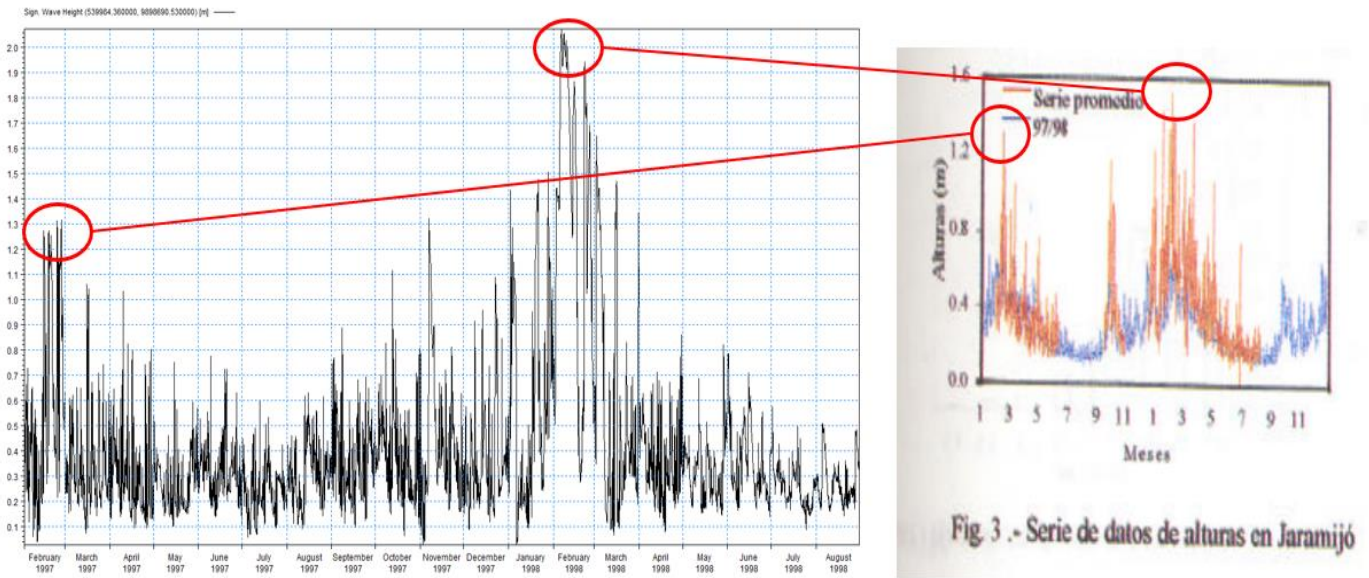
% Obtención de gráfico de oleaje
Options = {'anglenorth',0,'angleeast',90,'labels', {'N (0°)', 'E (90°)', 'S
(180°)', 'W(270°)'}, 'freqlabelangle',45,'cmap','invjet','lablegend','Altura[m]','TitleStr
ing',{'Rosa de oleaje'; 'Posición de la boya [278.75,0]'; 'Período: 1997-2019'}};

[figure_handle,
count,speeds,directions,Table]=WaveRose(w_theta,w_hsig,Options);

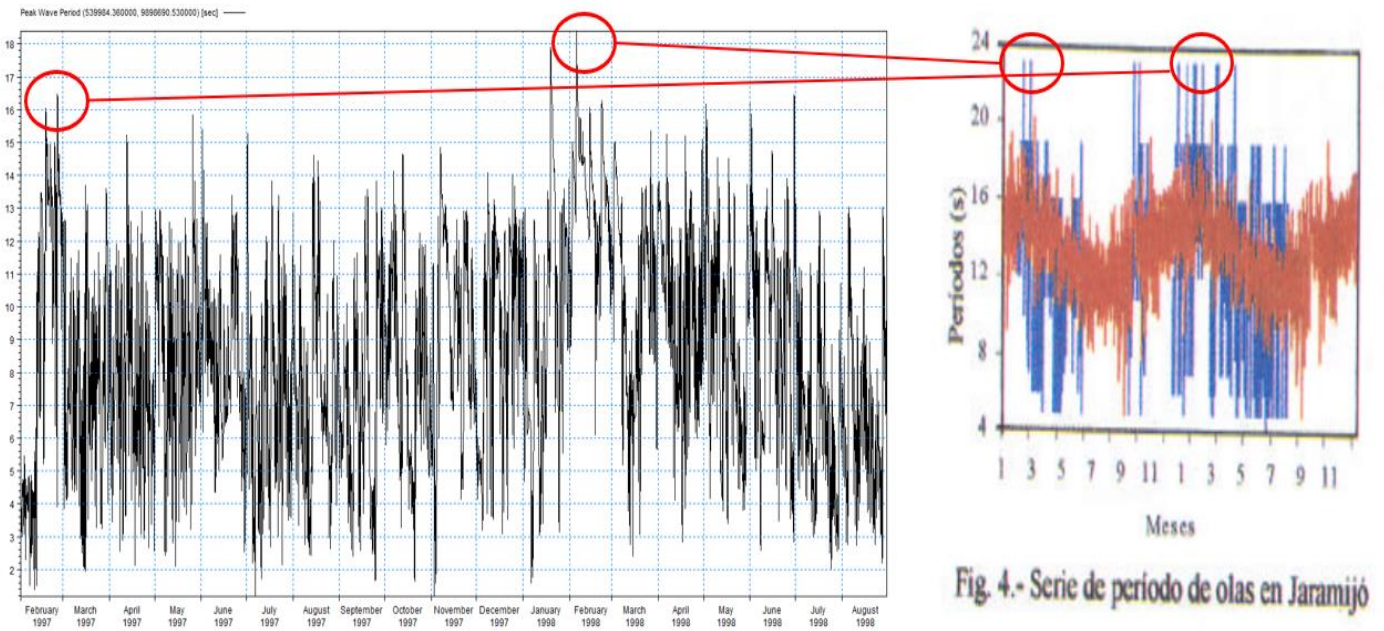
```

Apéndice C

Validación de la altura significativa del SW



Validación de periodo pico del SW



Apéndice D

Cálculos para validación del modelo BW

$d_s = 5 \text{ m}$

$H_i = 0.22 \text{ m}$

$T = 5.3 \text{ s}$

Longitud de onda

$$\frac{d_s}{L_0} = \frac{d_s}{1.56T^2} = \frac{5}{1.56(5.3)^2} = 0.11410$$

$$\frac{d}{L} = 0.1531$$

$$L = \frac{d_s}{\left(\frac{d_s}{L}\right)} = \frac{5}{0.1531} = 33 \text{ m}$$

Cada unidad de radio-longitud del diagrama mide 33 m.

Para conocer la altura de ola en el área difractada, por ejemplo, cuando K vale 0.8:

$$H = H_i * K'$$

$$H = 0.22 * 0.8 = 0.18 \text{ m}$$

Diagrama de difracción de olas – ángulo de ola 30°

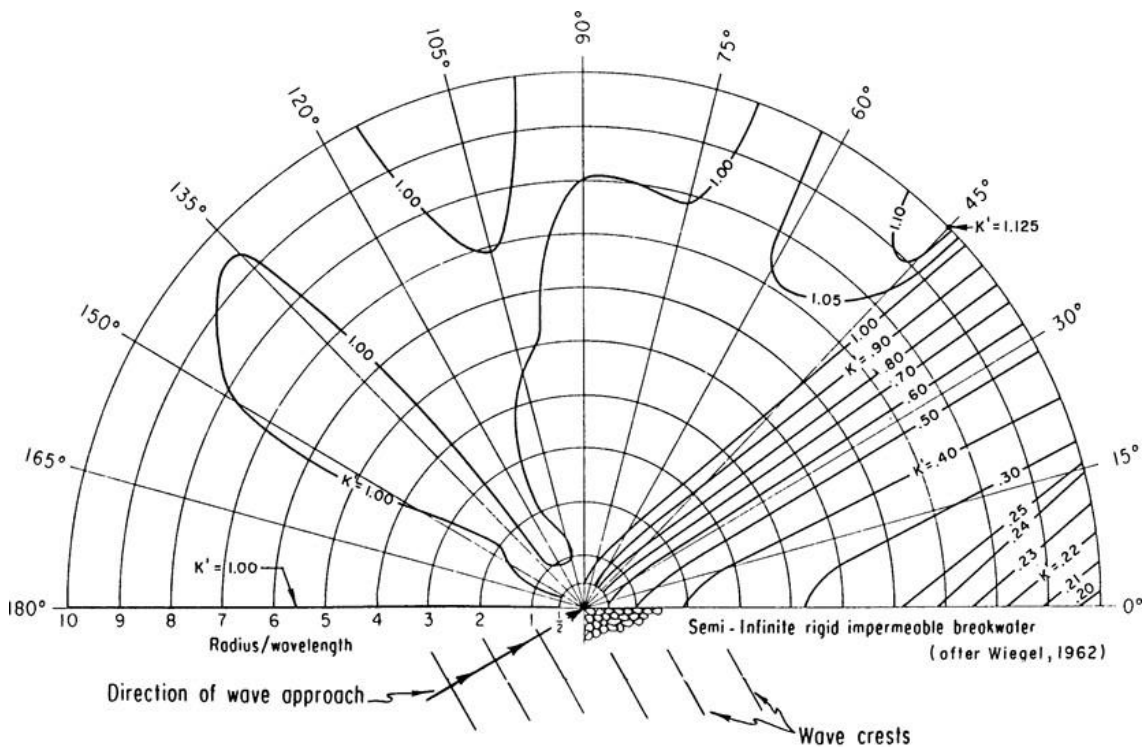


Figure 2-29. Wave diffraction diagram-- 30° wave angle.