



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

“VERIFICACIÓN DE UN TRAMO DE OBRA DEL PROYECTO “REPOSICIÓN INFRAESTRUCTURA MARÍTIMA MUELLE CALETA PORTALES”, MEDIANTE METODOLOGÍA R.O.M. 0.0”

Memoria de Título

PAMELA LORETO CEPEDA CORRALES

TUTORES: ASUNCIÓN BAQUERIZO AZOFRA
MIGUEL ÁNGEL LOSADA RODRIGUEZ
PATRICIO WINCKLER GREZ

VIÑA DEL MAR 2009

UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS
NATURALES
INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

PAMELA LORETO CEPEDA CORRALES

Comisión Evaluadora

Calificación

Nota

Firma

Ernesto Gómez A.

Evaluador 1

Patricio Winckler G.

Evaluador 2

Mauricio Reyes

Evaluador 3

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico

DECLARACIÓN

Este trabajo o alguna de sus partes no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena, o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizar con fines exclusivamente académicos.

.....

Pamela Cepeda

.....

Patricio Winckler G.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia que me apoyó desde principio cuando decidí cambiar mi rumbo, y estudiar ingeniería. Han sido mis papás y mis hermanas, un pilar fundamental en este camino.

A mis compañeros de la Universidad, a mis profesores, y en especial al profesor Ernesto Gómez por su apoyo y consejos que ha tenido para mí en estos últimos 3 años. A Patricio Winckler por su gran labor de educador y por dedicar su tiempo a nosotros. A mi director de carrera Sergio Bidart que siempre ha dado su apoyo a los alumnos, y al profesor Hernán Cortés que fue un gran compañero cuando estuvimos trabajando juntos. Todos han sido una gran guía para mi desarrollo profesional.

Quiero agradecer además a mis compañeros del grupo de Puertos y Costas, y en especial a mis compañeros de Máster, que juntos hemos pasado por muchos momentos.

A Asunción Baquerizo por su dedicación a la enseñanza, y por escucharme cuando lo necesita. A Miguel Ángel Losada como director y tutor, por su gran aporte a la enseñanza.

Y a Jesús que ha sido fundamental en este tiempo cuando me encuentro lejos de mi familia, y que ahora es mi familia. Gracias por estar conmigo, apoyarme y acompañarme cuando lo he necesitado.

INDICE

AGRADECIMIENTOS	4
1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 MOTIVACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	12
2 PROYECTO REPOSICIÓN INFRAESTRUCTURA MARÍTIMA MUELLE CALETA PORTALES 14	
2.1 ANTECEDENTES DE LA ACTUACIÓN	14
2.1.1 MARCO HISTÓRICO	14
2.1.2 OBJETIVOS.....	16
2.2 ANÁLISIS SECTOR PESQUERO CALETA PORTALES	17
2.2.1 ORGANIZACIÓN CALETA PORTALES	18
2.2.2 ANÁLISIS DE LA OFERTA	19
2.2.3 ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN CALETA PORTALES.....	19
2.3 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE PROYECTO	21
2.3.1 CONFIGURACIÓN FÍSICA	21
2.3.2 TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	23
3 APLICACIÓN METODOLOGÍA ROM 0. 0 A UN TRAMO DE OBRA	25
3.1 INTRODUCCIÓN.....	25
3.2 TRAMO DE OBRA.....	26
3.3 INTERVALO DE TIEMPO	28
3.4 CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO	28
3.4.1 CARÁCTER GENERAL DEL TRAMO I	28
3.4.2 CRITERIOS GENERALES.....	31
3.4.3 MÉTODO DE VERIFICACIÓN DEPENDIENTE DEL CÁRACTER DE LA OBRA	31

3.5	FACTORES DE PROYECTO	33
3.5.1	PARÁMETROS.....	33
3.5.2	AGENTES	35
3.5.3	ACCIONES.....	35
3.6	MODO DE FALLO PÉSIMO ADSCRITO A UN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO.....	36
3.7	VERIFICACIÓN DEL TRAMO I EN LA VIDA ÚTIL.....	37
3.7.1	ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS DEL CLIMA MARÍTIMO.....	37
3.7.2	SIMULACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO DURANTE LA VIDA ÚTIL.....	43
3.7.3	RESULTADOS	45
4	CONCLUSIÓN	47
	ANEXO 1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
	ANEXO 2. DEFINICIONES.....	52
	ANEXO 3. ESTUDIO DE OLEAJE.....	55
	ANEXO 4. ECUACIÓN DE MORISON ET AL. (1950).....	83
	ANEXO 5. DESCRIPCIÓN MODELO DE PROPAGACIÓN SWAN.....	90

INDICE TABLAS

Tabla 1: Organización Caleta Portales. Fuente: Ref.5.	18
Tabla 2: Organización Administrativa Caleta Portales. Fuente: Ref.5.	19
Tabla 3: Disposición de elementos para las labores de pesca. Fuente: Ref.5.....	19
Tabla 4: Detalle mano de obra por salida. Fuente: Ref.5.	20
Tabla 5: Ingresos y costos de Caleta Portales. Fuente: Ref.5.	20
Tabla 6: Resumen de los Criterios generales de proyecto para el tramo I.	31
Tabla 7. Métodos de verificación según el carácter general de la obra. Fuente: Ref.8.	32
Tabla 8. Tabla de incidencia Altura de ola H_{m0} v/s período T_p	61
Tabla 9. Porcentaje de ocurrencia para las diferentes direcciones.	62
Tabla 10. Tabla de incidencia Altura de ola H_{m0} v/s Dirección media DirM.	62
Tabla 11. Tabla de incidencia Período T_p v/s Dirección media de oleaje DirM.	63
Tabla 12. Tabla de incidencia Altura de ola H_{smax} v/s Periodo de pico T_p	66
Tabla 13. Tabla de incidencia Altura de ola H_{smax} v/s Dirección de oleaje DirM.	66
Tabla 14. Tabla de incidencia Periodo de oleaje T_p v/s Dirección de oleaje DirM.....	66
Tabla 15. Característica de la malla computacional para modelo SWAN	71
Tabla 16. Casos de propagación.	72
Tabla 17. Coordenadas de los puntos de control en la zona de estudio.....	73

INDICE FIGURAS

Figura 1. Muelle destruido en el año 2000 por el Mercante AVON. Fuente: Ref.4.	15
Figura 2. Mercante AVON varado en playa caleta Portales. Fuente: Archivos Patricio Winckler	15
Figura 3. Detalle ubicación de la caleta Portales, Valparaíso, V Región	17
Figura 4. Caletas pesqueras de mayor influencia en la Bahía de Valparaíso. Fuente: Ref.5.....	18
Figura 5. Disposición del actual muelle frente al muelle destruido. Fuente: Ref.4.....	22
Figura 6. Perfil muelle caleta Portales (Zona Cabezo). Fuente: Archivos Patricio Winckler.....	23
Figura 7. Actual muelle caleta Portales. Fuente: Archivos Patricio Winckler.	24
Figura 8. Disposición de los diferentes tramos identificados de caleta Portales. Fuente: Ref.6.	27
Figura 9. Detalle en planta del Muelle Cabezo	28
Figura 10. Ordenación de los factores de Proyecto según ROM 0.0	33
Figura 11. Disposición del Tramo I Muelle Cabezo. Fuente: Ref.6.	34
Figura 12. Esquema simulación durante la vida útil	39
Figura 13. Ajuste de la variable aleatoria altura de ola a una función de máximos, Fchet	40
Figura 14. Función de densidad de probabilidad empírica, y ajuste a una distribución Weibull, $\delta = 2.05$ y $\lambda = 12.85$	41
Figura 15. Función de densidad de probabilidad empírica, y ajuste a una distribución Frechet, $\beta = 0.53$ $\delta = 13.96$ y $\lambda = 220.13$	42
Figura 16. Función de densidad de probabilidad empírica, y ajuste a una distribución Normal, $\delta = 8.72$ y $\lambda = 24.94$	42
Figura 17. Estructura triangular de un temporal dividido en estados de mar de 3h.	44
Figura 18. Histograma de altura de ola obtenida de la simulación y del régimen de temporales.	45
Figura 19. Cálculo de la fuerza en cada ola individual generada, correspondiente a un estado de mar.	46
Figura 20. Ubicación del nodo de Valparaíso correspondiente a la base de información utilizada.	56
Figura 21. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de H_{m0}	58
Figura 22. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de T_p	58
Figura 23. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de $DirM$	59

Figura 24. Gráfico de dispersión Hm0 v/s Tp.	60
Figura 25. Gráfico de dispersión Hm0 v/s DirM	60
Figura 26. Gráfico de dispersión Tp v/s DirM	61
Figura 27. Método POT. Fuente: Ref.12.....	63
Figura 28. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de Hsmax de cada temporal.	64
Figura 29. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de Tp de cada temporal.	64
Figura 30. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de Dir de cada temporal.	65
Figura 31. Dominio de propagación para modelo SWAN	67
Figura 32. Batimetría de Valparaíso N° 5111	68
Figura 33. Batimetría de Valparaíso digitaliza por Surfer.	69
Figura 34. Detalle de los puntos de control en la zona de estudio.	73
Figura 35. Histograma de dirección de oleaje que llega a la zona de estudio.	74
Figura 36. Histograma de alturas de ola en la zona de estudio correspondiente a direcciones N, NW y NNW.	75
Figura 37. Propagación dirección de oleaje, NNW	76
Figura 38. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=4, Dir=NNW	76
Figura 39. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=6, Dir=NNW	77
Figura 40. Histograma de altura de ola en la zona de estudio correspondiente a direcciones WNW y W	77
Figura 41. Propagación dirección de oleaje, WNW	78
Figura 42. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=4, Dir=WNW	79
Figura 43. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=6, Dir=WNW	79
Figura 44. Histograma de altura de ola en la zona de estudio correspondiente a direcciones WSW y SW y SSW.....	80
Figura 45. Propagación dirección de oleaje, SW	81
Figura 46. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=4, Dir=SW	81
Figura 47. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=6, Dir=SW	82

RESUMEN

El siguiente Proyecto de Título presenta la aplicación de la metodología propuesta en la ROM 0.0, “Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias”, para verificar la seguridad de un tramo de obra del Muelle Caleta Portales (Valparaíso, V Región), durante su vida útil.

Para su realización, se analizan los antecedentes y los objetivos del proyecto " Reposición de Infraestructura Marítima del Muelle Caleta Portales" llevado a cabo por la Dirección de Obras Portuarias, DOP tras la destrucción del muelle anterior por el mercante Avon en el año 2000. A partir de dicha información se evalúan, para el tramo “cabezo”, el carácter general que mide las repercusiones económicas, sociales y ambientales que ocurrirían en el caso de que se produjera un modo de fallo pésimo.

Conocido el carácter general, se determinan los Criterios Generales recomendados por la ROM 0.0 y se analizan los factores de proyecto que incluyen la definición de los parámetros, agentes y acciones.

De entre los modos de fallo *Deformación*, *Inestabilidad* ó *Colapso progresivo* (Ref.10), se estima el modo de fallo pésimo *Pérdida del equilibrio estático* del muelle de pilotes y se elige para realizar su verificación, el método de Nivel III durante la vida útil de la obra frente a la acción predominante del oleaje. Este tipo de modo de fallo se encuentra adscrito a un estado límite último, y se refiere a aquel estado que produce la ruina o colapso de la obra debido a la ocurrencia e interacción de agentes climáticos sobre la estructura. Una de las primeras simplificaciones es que no se plantea un modelo estructural, sino que se estudia la verificación de un pilote, utilizando para el cálculo de la fuerza, la ecuación de Morison et al. (1950) (ANEXO 4).

La ecuación de Morison et al. (1950) (Ref.15 y 16) se basa en la teoría lineal de oleaje y sólo es válida cuando la relación D/L es menor a 0.05. Estima una fuerza de arrastre dependiente de la velocidad, y una fuerza de inercia, dependiente de la aceleración del fluido sobre una estructura cilíndrica vertical. Para el desarrollo de esta ecuación, es necesario el conocimiento de parámetros físicos de la estructura como su diámetro y longitud, densidad, régimen del flujo, y de parámetros del oleaje como su velocidad y aceleración.

Para ello, se analizan cuatro años de datos de oleaje (2000-2004) medidos en zona de aguas profundas a más de 35[km] de Caleta Portales, y se obtiene el régimen de temporales. Los datos se propagan con el modelo SWAN.

La ROM 0.0 establece que mientras las actuaciones más pequeñas se pueden verificar con los métodos clásicos de coeficientes de seguridad Global o Parcial (Nivel I), para las acciones de mayor envergadura, recomienda recurrir a métodos probabilísticos de verificación (Nivel II ó momentos estadísticos y técnicas de optimización, y Nivel III ó integración y simulación numérica). En este proyecto se estudia la ocurrencia de las variables aleatorias en forma probabilista, y por lo tanto, se simulan con Técnica Monte Carlo los ciclos de sollicitación durante la vida útil. La interpolación de la simulación en los estados de mar propagados, y finalmente la obtención de olas individuales en la zona de estudio, alimentarán la ecuación de verificación, y dará respuestas sobre la ocurrencia o no del modo de fallo.

Para el desarrollo de la Memoria de Título se ha consultado una serie bibliográfica acorde con el tema propuesto (ANEXO 1). Además, se anexa un apartado con las definiciones necesarias para seguir el procedimiento ROM 0.0 utilizado en esta Memoria (ANEXO 2), los fundamentos teóricos de la ecuación de Morison et al. (1950) (ANEXO 4) para el cálculo de las fuerzas sobre el pilote, y los fundamentos teóricos del modelo de propagación SWAN (ANEXO 5).

1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el 90% del volumen de bienes que se transportan en el mundo lo hacen por vía marítima (Ref.1), y en Chile el transporte marítimo moviliza más del 80% del comercio exterior (Ref.2). Frente a este hecho y dado el avance de nuevas tecnologías en instalaciones portuarias, se ha planteado la necesidad de construir obras marítimas en las que se exigen cada vez más altos estándares de seguridad minorizando repercusiones económicas, sociales y ambientales.

Una obra marítima no debe entenderse entonces como un ente que actúa por sí solo, sino que interactúa con el entorno social y ambiental en el que está emplazado. Por ello, uno de los principales objetivos de un proyecto es determinar si la estructura propuesta será confiable con respecto a la seguridad, funcional en lo que respecta a la prestación de los servicios, y operativa con respecto a su uso y aprovechamiento.

Hasta la fecha ha sido común realizar los cálculos con una ola de diseño correspondiente a un período de retorno dado. Esta forma de proceder no parece adecuada en la actualidad y es que, de acuerdo a la creciente conciencia social y ambiental, el diseño debe buscar que las estructuras sean confiables, seguras y con costos de construcción y mantenimiento razonables.

En este sentido, se han ido desarrollando nuevos métodos para el diseño que tienen en cuenta todos estos aspectos. Cabe destacar entre ellos la metodología propuesta por la ROM 0.0 con la que se aborda la verificación del tramo de Caleta Portales que es el objetivo de este estudio.

1.2 MOTIVACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

Siguiendo con la línea de desarrollo que se ha implantado en las recomendaciones para obras marítimas, programa ROM, la ROM 0.0 es una revisión de los capítulos referentes a los Criterios Generales y las bases de cálculo presentadas en la ROM 02, ***Acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias***, pero proporciona una integración de criterios, no sólo en aspectos de seguridad frente a la construcción y a la permanencia de la misma, sino también sobre la responsabilidad medio-ambiental y social que deben ser considerados en el proyecto, construcción, conservación, reparación y desmantelamiento de la obra.

La ROM 0.0 incorpora nuevos conceptos en el dimensionamiento y verificación de las obras marítimas, incluyendo tanto los modelos clásicos como los modelos probabilistas que consideran las variables no como deterministas sino como aleatorias, con el consiguiente tratamiento

estadístico del problema, lo que permite dar respuesta a las incertidumbres inherentes a los fenómenos aleatorios.

En este trabajo se aplica la metodología propuesta por la ROM 0.0 a un tramo de obra del Muelle Caleta Portales (Valparaíso, V región). De entre todos los modos de fallo, se ha elegido el modo de fallo principal ***Pérdida del equilibrio estático*** adscrito a un estado límite último para su verificación frente a la seguridad durante la vida útil de la obra.

El proyecto se expone de la siguiente forma: en primer lugar se analizan los antecedentes y los objetivos del proyecto “Reposición de Infraestructura Marítima del Muelle Caleta Portales” llevado a cabo por la Dirección de Obras Portuarias, DOP, y en segundo lugar se aplica el procedimiento general propuesto en la ROM 0.0 para la verificación del tramo de obra.

2 PROYECTO REPOSICIÓN INFRAESTRUCTURA MARÍTIMA MUELLE CALETA PORTALES

2.1 ANTECEDENTES DE LA ACTUACIÓN

2.1.1 MARCO HISTÓRICO

Luego de la destrucción del muelle de Caleta Portales, ocurrido en el año 2000 por el mercante AVON (Figura 1 y Figura 2), la Dirección de Obras Portuarias, DOP, estima necesario dar una solución, y pone de manifiesto su interés en otorgar un proyecto que incluya obras marítimas y terrestres con el fin de restaurar las condiciones de trabajo que fueron afectadas. Estas obras constituirán el reemplazo definitivo a las obras del muelle destruido. Con este proyecto se propone asegurar la pesca artesanal y favorecer el ordenamiento del borde costero del sector de Valparaíso, por su relevancia como centro de desarrollo productivo y turístico para la región.

La intervención de la DOP se enmarca en el Programa de Infraestructura Portuaria Pesquera Artesanal a nivel nacional, siguiendo con su misión de “planificar, proyectar, construir y conservar oportunamente la infraestructura costera y portuaria, marítima, fluvial y lacustre necesaria para el desarrollo socioeconómico del país y la conectividad física nacional e internacional”. El propósito del Programa es “que las caletas pesqueras productivas con registro pesquero, mejoren sus condiciones de operación, higiénicas y de seguridad a través de la construcción de infraestructura portuaria pesquera artesanal” con el fin de “contribuir a mejorar la calidad de vida y el desarrollo de los usuarios de las caletas de pesca artesanal” (Ref.3).

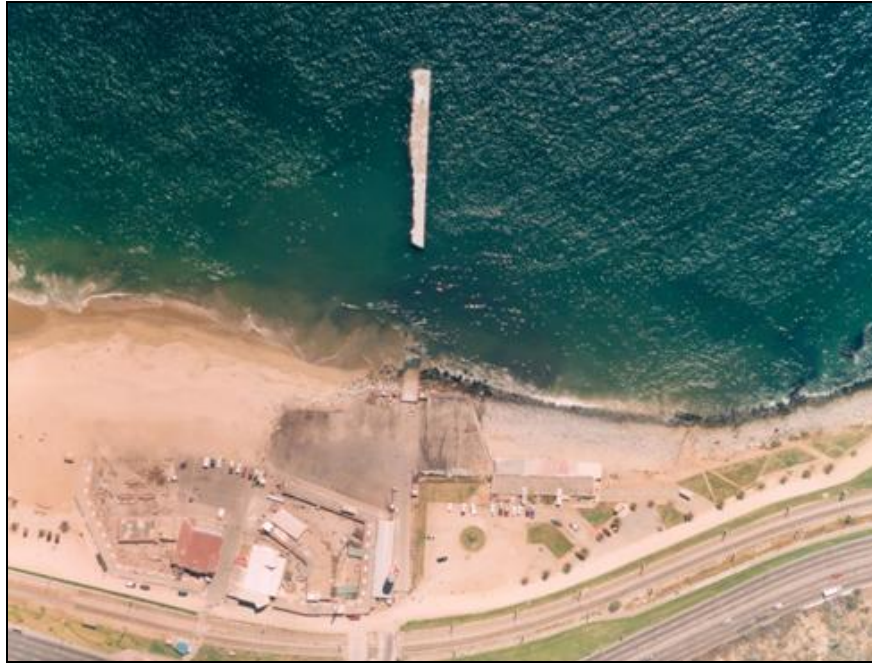


Figura 1. Muelle destruido en el año 2000 por el Mercante AVON. Fuente: Ref.4.



Figura 2. Mercante AVON varado en playa caleta Portales. Fuente: Archivos Patricio Winckler

2.1.2 OBJETIVOS

En el proyecto denominado “Reposición Infraestructura Marítima Caleta Portales”, se plantean los siguientes objetivos:

- Generar la cohesión entre la caleta y las actividades productivas y turísticas del sector, permitiendo además remodelar instalaciones que han cumplido con la vida útil.
- Construir una infraestructura marítima portuaria que permita atender de manera óptima, la flota de la organización de caleta Portales, dando solución a los problemas generados por la destrucción del muelle en el año 2000.

Dicho lo anterior, la Dirección de Obras Portuarias considera además:

- Estimar aquellas alternativas que justifiquen técnicamente la cantidad, la disposición en planta y dimensiones de las obras, analizando el nivel organizacional del sindicato y los requerimientos funcionales de dicha organización.
- Identificar aquellas alternativas que son económicamente viables para la financiación por parte del M.O.P.-D.O.P. en obras relacionadas con la actividad pesquera artesanal, y económicamente viables por parte del sector privado.

Es importante señalar que finalmente la solución que se plantea desarrollar debe cumplir además, con un marco normativo referencial que queda recogido principalmente en los siguientes documentos:

- Estrategia de Desarrollo Regional -2000
- Alternativas de Uso del Borde Costero de la provincia de Valparaíso
- Plan intercomunal de la provincia de Valparaíso
- Plan Regulador de la Comuna de Valparaíso
- Plan Maestro de la Empresa Portuaria de Valparaíso
- Aéreas de manejo y cultivo para las caletas pesqueras
- IV Etapa, estudio realizado por MERVAL

Específicamente, en el Estudio de Alternativas de Uso del Borde Costero de la provincia de Valparaíso, que se redacta como respuesta a la necesidad de realizar una planificación, y

ordenación de la utilización de los suelos costeros de la comuna, caleta Portales se identifica como una Unidad de Desarrollo junto con los sectores Prat, Bellavista, Barón y Yolanda Barón. Esto quiere decir que caleta Portales se entiende como un sector con atributos particulares que habilitan la generación de una actividad determinada, pero se encuentra en una situación inestable, por cuanto se requiere de una mayor intervención y oportunidades reales de inversión en el corto plazo. Esto lograría recuperar la integración de su actividad de desarrollo en conjunto con otras como comercio, transporte, turismo, sector inmobiliario, entre otros.

Por otro lado, debido a que la caleta Portales promueve comercio en forma directa con la comuna, se plantea como una organización con una actividad sustentable en el tiempo, que debe propender al desarrollo sostenible. Esto se relaciona con uno de los objetivos de la estrategia de Desarrollo Regional, que es desarrollar actividades económicas en la región promoviendo su expansión, modernización y competitividad.

2.2 ANÁLISIS SECTOR PESQUERO CALETA PORTALES

La caleta de pescadores de Portales se encuentra ubicada en la V Región, específicamente en la zona de transición entre Viña del Mar y Valparaíso. Se sitúa sobre una amplia playa arenosa, abierta al norte cuya pendiente es relativamente abrupta. La Figura 3 muestra la ubicación de caleta Portales en la Bahía de Valparaíso, V Región.



Figura 3. Detalle ubicación de la caleta Portales, Valparaíso, V Región

A nivel regional, caleta Portales pertenece a un conjunto de caletas de carácter permanente, situadas en la provincia de Valparaíso. Junto a ellas se encuentran las caletas de Alejandro Selkirk, Concón, El Membrillo, Higuierillas, Juan Fernández, Laguna Verde, Montemar, Quintay y Sudamericana. Caleta Portales representa un 20% de un total de 1.306 pescadores en Valparaíso, V Región, luego de Caleta Sudamericana y comparte con la Caleta Membrillo y Sudamericana el área de influencia de la Bahía de Valparaíso (Figura 4).



Figura 4. Caletas pesqueras de mayor influencia en la Bahía de Valparaíso. Fuente: Ref.5.

2.2.1 ORGANIZACIÓN CALETA PORTALES

Caleta Portales se encuentra organizada a través del “Sindicato de Trabajadores Independientes Pescadores Artesanales de Caleta Portales de Valparaíso” al cual están adscritos los siguientes oficios:

CATEGORIA	CANTIDAD
Buzo	3
Pescadores	244
Ayudante Pescador	14
Patrón	2
TOTAL	263

Tabla 1: Organización Caleta Portales. Fuente: Ref.5.

Además del personal administrativo que se indica en el siguiente cuadro:

ADMINISTRACION	CANTIDAD
Secretaria Sindicato	1
Secretaria Bienestar Social	1
Secretaria Zarpe	1
Enfermera Policlínico	1
Administrador zarpe	1
TOTAL	5

Tabla 2: Organización Administrativa Caleta Portales. Fuente: Ref.5.

2.2.2 ANÁLISIS DE LA OFERTA

Para realizar las labores de pesca, la caleta cuenta con la siguiente flota que opera en promedio tres veces por semana en un total de 240 días, lo que supone aproximadamente 26.160 salidas anuales:

EMBARCACION	CANTIDAD
Bote Remo	8
Bote Motor	109
Otros	117
TOTAL	234

Tabla 3: Disposición de elementos para las labores de pesca. Fuente: Ref.5.

2.2.3 ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN CALETA PORTALES

2.2.3.1 CAPACIDAD DE OPERACIÓN

Con respecto al volumen promedio de captura, la V región registra un desembarque de 40.332 de toneladas (año 2004), siendo para caleta Portales un volumen de captura promedio de todas las especies en los últimos 5 años de 3.145, 54 toneladas, valoradas en M\$ 2.224.543.- como ingresos brutos, y como ingresos netos de M\$ 1.338.429.-

Luego la valorización bruta del producto marino promedio es de \$/Kg 709.- y su correspondiente valor neto es de 425 \$/Kg.(Fuente: Ref.5)

2.2.3.2 FUERZA DE TRABAJO

La fuerza de trabajo en Caleta Portales está recogida en el siguiente cuadro:

CATEGORIA	PORTALES
Tripulantes por cada bote	3
Encarnadores por cada bote	3
Acarreador de espineles al bote	2
Acarreador de espineles al lugar de	2
Malabaristas (separan la pesca, la venden,	1
Pescador por cuenta del comprador	0
Cargadores al camión comprador	1
Bolincheros (que pescan la carnada)	1
TOTAL	25
TOTAL EMBARCACIONES	109
TOTAL MANO DE OBRA UTILIZADA	2.725

Tabla 4: Detalle mano de obra por salida. Fuente: Ref.5.

La actividad de pesca, considerando que caleta Portales en promedio realiza tres salidas semanales durante los 12 meses del año, requiere un número de personas considerable como muestra la Tabla 4. Por esta razón, la mantención de la fuerza laboral y por tanto del arte de la pesca, es uno de los objetivos que se pretende alcanzar con la reposición de las infraestructuras dañadas.

2.2.3.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Caleta Portales registra los siguientes ingresos por concepto de venta de sus productos, y costos por concepto de mantención y operación de las embarcaciones:

	Ingresos Promedios brutos M\$	60% Ingresos promedios netos M\$	Costos operación y mantención M\$	Costo promedio por embarcación, mantención y operación M\$
Caleta Portales	2.230.715	1.338.429	892.286	7.626

Tabla 5: Ingresos y costos de Caleta Portales. Fuente: Ref.5.

Los ingresos promedios netos, representan la utilidad promedio anual que obtiene caleta Portales por concepto de ventas de sus productos.

2.3 DESCRIPCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE PROYECTO

Según el análisis anterior se concluye que el objetivo primordial del proyecto presentado por la DOP en 2003 es restablecer las condiciones de trabajo que fueron afectas por la destrucción del muelle por el mercante AVON en el año 2000. Por otro lado, se considera importante asegurar la pesca artesanal y comercio local logrando así una cohesión entre la caleta y las actividades portuarias y turísticas del sector. En relación con este punto, es importante la ordenación del borde costero promoviendo el comercio y turismo a nivel regional.

Para ello se plantea una alternativa que satisfaga con los objetivos y los requerimientos de uso y explotación de la caleta que se han expuesto. En este punto, se desconoce la forma de evaluación de la alternativa por parte de la DOP, y por lo tanto la cuantificación de los requisitos de proyecto, aunque los antecedentes de la caleta dan una valoración general.

2.3.1 CONFIGURACIÓN FÍSICA

Para las obras de infraestructura marítima, se estima oportuno la construcción de un muelle estructurado por pilotes metálicos y losa de hormigón armado, que corresponde a una estructura de atraque y amarre fija. El muelle se orienta paralelo al muelle destruido (Figura 5), que se prolonga con el fin de proporcionar atraques para botes y lanchas. Además, se propone ampliar la explanada de trabajo existente.

2.3.1.1 DESCRIPCIÓN EN PLANTA

El nuevo muelle tiene la siguiente configuración física en planta:

- Orientación: Se proyecta un muelle paralelo al muelle destruido con orientación NW.
- Longitud total muelle: 161[m].
- Dimensiones puente de acceso: 91[m] de longitud y 7[m] de ancho.
- Dimensiones de cabezo: 70[m] de longitud y 12.9[m] de ancho.
- Explanada de trabajo: Ampliación, de los 900[m²] existentes, a 5000[m²].

La Figura 5 muestra la disposición de los dos muelles en forma paralela. En color verde, el muelle destruido por el Mercante AVON, y en naranja el actual muelle.



Figura 5. Disposición del actual muelle frente al muelle destruido. Fuente: Ref.4.

2.3.1.2 DESCRIPCION EN ALZADO

El muelle tiene las siguientes características en alzado

- Nivel de coronación: +5.20[m] NRS.
- Calado de atraque: -6.0[m]. en el cabezo donde se ubican las chazas.



Figura 6. Perfil muelle caleta Portales (Zona Cabezo). Fuente: Archivos Patricio Winckler

2.3.2 TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL

La estructura muelle se sustenta mediante pilotes y se recogen las siguientes especificaciones:

- Pilotes de acero verticales e inclinados.
- Dimensiones de los pilotes: Para el puente de acceso se contemplan pilotes de 12 $\frac{3}{4}$ ”, y para el cabezo se contemplan pilotes de 14”.
- Disposición de los pilotes: Los pilotes se disponen de manera rectangular, con separación longitudinal de 5[m].

La Figura 7 muestra el actual muelle Caleta Portales propuesto por la DOP. Se observa la disposición del muelle paralelo a la costa, estructurado por pilotes, verticales e inclinados.



Figura 7. Actual muelle caleta Portales. Fuente: Archivos Patricio Winckler.

3 APLICACIÓN METODOLOGÍA ROM 0. 0 A UN TRAMO DE OBRA

3.1 INTRODUCCIÓN

Como se planteó en la introducción, una obra marítima interactúa con su entorno y como tal debe cumplir ciertos requisitos durante su vida útil. Se espera que una obra sea fiable, es decir, que cumpla ciertos grados de seguridad, que sea funcional en lo que respecta a su comportamiento formal y que sea operativa, es decir, que durante cierto intervalo tiempo la obra esté en condiciones de ser utilizada. El cumplimiento de estos requisitos de proyecto debe ser verificado tomando en consideración todos aquellos elementos que se encuentran presentes y que interactúan con la obra. Si estos requisitos no se cumplieran, se puede decir que la obra no es fiable, funcional y operativa.

Con este propósito, la ROM 0.0 propone una secuencia de actividades que permiten cumplir los objetivos pasando por dos puntos muy importantes: (1) poder especificar los requisitos de proyecto en la vida útil de la obra, y (2) comprobar que estos requisitos se cumplan.

Para ello, la ROM 0.0 introduce algunos conceptos y define una serie de términos con el fin de establecer las bases del diseño. Es así, que aparecen los términos ***Tramo de Obra, Criterios de Proyecto, Condicionantes de Proyecto e Intervalo de Tiempo.***

Tramo de Obra: Se considera que la obra se divide en tramos, considerando las partes de aquella en la que sus elementos forman parte de una misma tipología, cumplen de forma solidaria la función para la que han sido diseñados y están sometidos a los mismos niveles de sollicitación.

Criterios de Proyecto: Sirven para definir y verificar el proyecto desde el punto de vista de la seguridad, el servicio y el uso y la explotación.

Condicionantes de Proyecto: Definen el tramo de obra y su entorno mediante la especificación de los factores de proyecto que incluyen a los parámetros, agentes y acciones.

Intervalo de Tiempo: La definición de estos términos, su descripción y clasificación, se realiza en una sucesión de intervalos de tiempo que constituyen las fases por las que pasa cada tramo de obra desde su construcción hasta su desmantelamiento.

Finalmente, el proceso de verificación permite comprobar si, para los factores de proyecto considerados, la obra cumple los criterios de proyecto. Para ello se consideran los modos en los

que la obra puede fallar desde el punto de vista de la seguridad, el servicio y el uso y la explotación, y se modelan mediante ecuaciones de verificación.

De forma simplificada, la aplicación de la ROM 0.0 consta de los siguientes pasos, que deben aplicarse a cada tramo de obra durante cada uno de los intervalos de tiempo por los que éste puede pasar:

- Identificar el tramo de obra y el intervalo de tiempo en el cual se va a verificar.
- Evaluar el carácter de la obra en función de su repercusión económica, social y ambiental en el caso que se produjera un modo de fallo o de parada. A partir de ello, establecer los valores recomendados por la ROM 0.0, para la vida útil mínima, máxima probabilidad de fallo último y de servicio, operatividad mínima, máximo número medio de paradas operativas y duración máxima admisible de la parada operativa.
- Obtener los factores de proyecto que se refieren a la identificación de los parámetros, agentes y acciones que intervienen en la obra.
- Considerar los diferentes estados límites y especificar los modos en los que la obra puede fallar.
- Establecer las ecuaciones que modelan los modos de fallo y realizar la verificación.

En este trabajo, la aplicación de la ROM 0.0 se acota a la verificación por un método de nivel III, durante la vida útil, del muelle frente al modo de fallo ***Pérdida del equilibrio estático*** adscrito a un estado límite último.

Para una mejor comprensión de los conceptos necesarios para el desarrollo de la verificación, el ANEXO 2 incluye aquellos que son utilizados en el proyecto. Estas definiciones son recogidas textualmente de la ROM 0.0.

3.2 TRAMO DE OBRA

Según la definición dada anteriormente, pueden considerarse para el muelle caleta Portales los siguientes tramos de obra (Figura 8):

- Tramo I: Muelle Cabezo
- Tramo II: Muelle Puente de Acceso

- Tramo III: Explanada de trabajo



Figura 8. Disposición de los diferentes tramos identificados de caleta Portales. Fuente: Ref.6.

Este proyecto se centra en la verificación del tramo I denominado “Muelle Cabezo” que es el que está más expuesto a las acciones del agente oleaje y por ello sometido a las mayores solicitaciones.

El tramo I posee las siguientes características:

- Orientación: NW
- Longitud: 70[m]
- Ancho: 12.96[m]
- Cota de coronación: +5.2[m] NRS
- Tipología: Pilotes tubulares de acero de 14” de diámetro
- Distancia entre pilotes desde el eje (ancho): 4[m]
- Distancia entre pilotes desde el eje (largo): Del cabezo a la primera fila de pilotes, 4.5[m], y desde ésta hasta la última (la más próxima al arranque), 5.0[m].

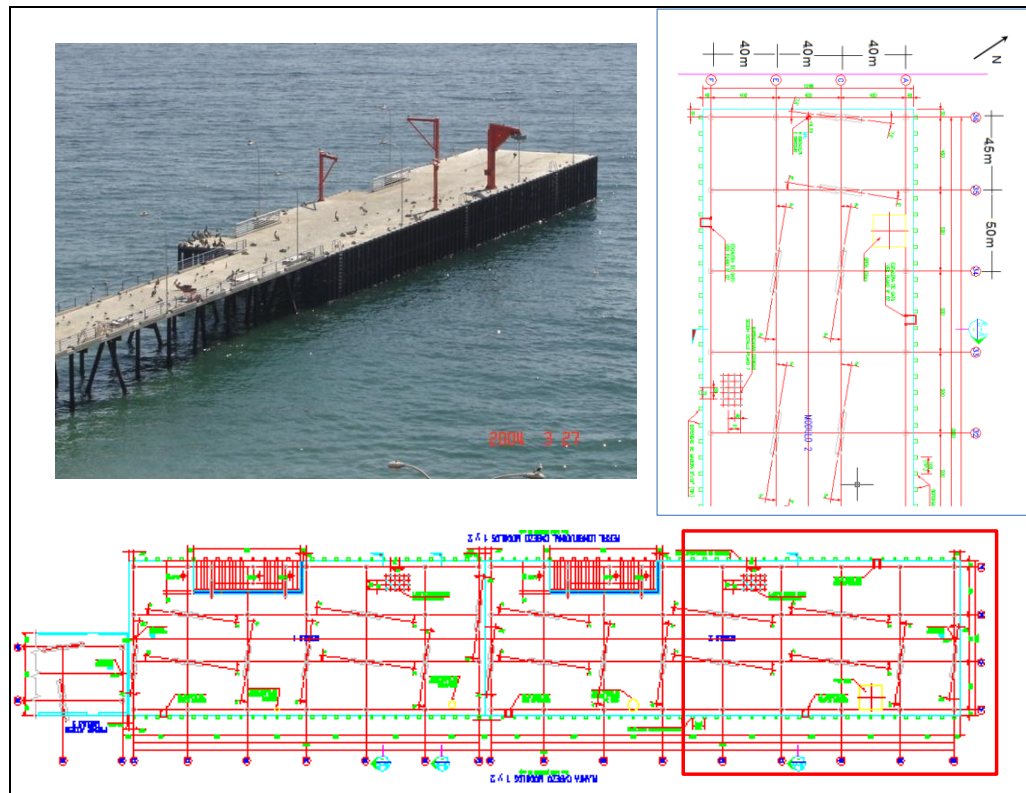


Figura 9. Detalle en planta del Muelle Cabezo

3.3 INTERVALO DE TIEMPO

Se considera como intervalo de tiempo la vida útil de la obra, es decir, el tiempo en el que está de servicio.

3.4 CRITERIOS GENERALES DE PROYECTO

Una vez definido el tramo, se evalúa el carácter general del tramo I:

3.4.1 CARÁCTER GENERAL DEL TRAMO I

El carácter general define la importancia de la obra, y se establece en función de aspectos esenciales como su repercusión económica, social y ambiental en caso de destrucción frente al

modo de fallo pésimo adscrito a un estado límite último. En este caso se considera la pérdida del equilibrio estructural del pilote como modo de fallo pésimo.

El carácter general de la obra es determinado a partir de los siguientes índices:

- Índice de repercusión económica, IRE
- Índice de repercusión social y ambiental, ISA

Se puede tener una idea de la importancia de caleta Portales ante su destrucción o pérdida de su funcionalidad por lo acontecido el año 2000. Este evento se tradujo en repercusiones económicas importantes y sociales dado su carácter.

3.4.1.1 INDICE DE REPERCUSSION ECONOMICA, IRE

El índice de repercusión económica IRE, relaciona cuantitativamente las repercusiones económicas de los siguientes costos:

Costo C_{RD} : Se refiere a los costos de ejecución por contrata de las obras de reconstrucción de la obra marítima.

Debido a que no se tiene antecedentes sobre los costos de reconstrucción del tramo I del muelle destruido en el año 2000 tras la colisión con el mercante AVON, se considera para este caso, el costo que significó la construcción del tramo I del nuevo muelle. Estos datos son proporcionados por la Dirección de Obras Portuarias en la planificación de la reconstrucción del Muelle en el año del 2003:

- $C_{RD} = \$548.200.000$ (Ref.5)

Costo C_{RI} : Se refiere a los costos de las repercusiones económicas por cese e influencia de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra, y queda representado por los ingresos promedios neto que dejaría de percibir anualmente si cesaran las actividades en el muelle. En este caso el valor de CRI es:

- $C_{RI} = \$1.338.429$. (Ref.5)

C0: Es un parámetro económico adimensional, que para Chile se ha fijado en \$1.200.000.000. (Valor considerado en mesa de trabajo durante el desarrollo de la memoria)

A partir de estos valores, el Índice IRE se puede calcular de la siguiente forma:

$$IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0}$$

Por lo que según el punto 2.7.1.5 de la ROM 0.0, se trata de una **Obra con repercusión económica baja**.

3.4.1.2 INDICE DE REPERCUCION SOCIAL Y AMBIENTAL, ISA

El índice de repercusión social y ambiental ISA, relaciona cualitativamente el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse, una vez consolidadas las actividades económicas relacionadas con la obra, la destrucción o la pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de los siguientes sucesos a través de diferentes índices ISA_i :

- Pérdida de vidas humanas (ISA_1)
- Daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico y artístico (ISA_2)
- Alarma social generada (ISA_3)

El índice ISA se define por la sumatoria de los tres subíndices:

$$ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i$$

Para la cuantificación de cada subíndice, se tendrán en cuenta las características y función específica del tramo I, y se elegirán según los puntos 2.11.3.1, 2.11.3.2, y 2.11.3.3 de la ROM 0.0.

Los valores estimados para estos subíndices son:

- $ISA_1 = 0$ (Remoto)
- $ISA_2 = 2$ (Bajo)

- $ISA_3 = 0$ (Bajo)

Por lo que según el punto 2.11.4 de la ROM 0.0, se trata de una **Obra sin repercusión social ni ambiental significativa.**

3.4.2 CRITERIOS GENERALES

Para los valores de IRE e ISA obtenidos, la ROM 0.0 recomienda los siguientes valores:

Criterios de Proyecto	
Vida útil mínima	15
Probabilidad máxima de fallo en ELU	0.20
Probabilidad máxima de fallo en ELS	0.20

Tabla 6: Resumen de los Criterios generales de proyecto para el tramo I.

Debe señalarse que la probabilidad de fallo se refiere a la probabilidad conjunta de todos los modos de fallo.

Dada la dificultad que supone su cálculo, puede considerarse el modo de fallo pésimo, y tomar para él, el valor recomendado como cota superior de la probabilidad de fallo, siempre que pueda garantizarse mediante inversiones pequeñas, que los demás modos de fallo ocurren con una pequeñísima probabilidad.

Debido a que no se verifica la operatividad, se obvia el cálculo de los índices *IREO* e *ISAO*. Estos índices definen la importancia que tiene la obra en función de la repercusión económica, el impacto social y ambiental cuando la obra deja de operar o reduce su nivel de operatividad. La valoración del carácter operativo de la obra se evalúa seleccionando de entre los modos principales de parada operativa, aquel que proporcione el nivel mínimo de operatividad y entrega información sobre la operatividad mínima, el número medio de paradas operativas y duración máxima de una parada operativa.

3.4.3 MÉTODO DE VERIFICACIÓN DEPENDIENTE DEL CÁRACTER DE LA OBRA

Dependiendo del carácter general de la obra definido mediante los índices *IRE* e *ISA*, la ROM 0.0 sugiere utilizar diferentes métodos de verificación:

<i>IRE</i>	<i>ISA</i>			
	<i>s₁</i>	<i>s₂</i>	<i>s₃</i>	<i>s₄</i>
<i>r₁</i>	(1)	(2)	(2) y (3) o (4)	(2) y (3) o (4)
<i>r₂</i>	(2)	(2)	(2) y (3) o (4)	(2) y (3) o (4)
<i>r₃</i>	(2) y (3) o (4)	(2) y (3) o (4)	(2) y (3) o (4)	(2) y (3) o (4)

Tabla 7. Métodos de verificación según el carácter general de la obra. Fuente: Ref.8.

Donde los valores de la Tabla 7 se refieren a los siguientes métodos:

- (1) Coeficiente de seguridad Global. (Método de Nivel I)
- (2) Coeficientes Parciales. (Método de Nivel I)
- (3) Momentos estadísticos y técnicas de optimización (Método de Nivel II)
- (4) Integración y Simulación numérica. (Método de Nivel III)

Los subíndices del *IRE* se refieren a la clasificación que hace la ROM 0.0 en función del valor que puede tomar. Según el punto 2.7.1.5 de la ROM 0.0 estos son:

- *r₁*: Obras con repercusión económica baja: $IRE \leq 5$
- *r₂*: Obras con repercusión económica media: $5 < IRE \leq 20$
- *r₃*: Obras con repercusión económica media: $IRE > 20$

Y la clasificación del índice *ISA*, según el punto 2.7.1.7 de la ROM 0.0 es:

- *s₁*: Obras sin repercusión social y ambiental significativa: $ISA < 5$
- *s₂*: Obras con repercusión social y ambiental baja: $5 \leq ISA < 20$
- *s₃*: Obras con repercusión social y ambiental alta: $20 \leq ISA < 30$
- *s₄*: Obras con repercusión social y ambiental muy alta: $ISA \geq 30$

De acuerdo a los valores de los índices obtenidos, sería suficiente utilizar un método de nivel I, no obstante se utilizará en este trabajo un método de nivel III.

3.5 FACTORES DE PROYECTO

Se refiere a la caracterización del tramo de obra en términos de sus propiedades, los elementos que lo componen y que comprueban la seguridad, el servicio y la explotación. Esto se logra mediante la especificación de los factores de proyecto que engloban los parámetros, agentes y acciones. La Figura 10 muestra una clasificación y ordenación que hace la ROM 0.0 de los factores de proyecto. En rojo se muestran los agentes y acciones que se consideran en este proyecto:

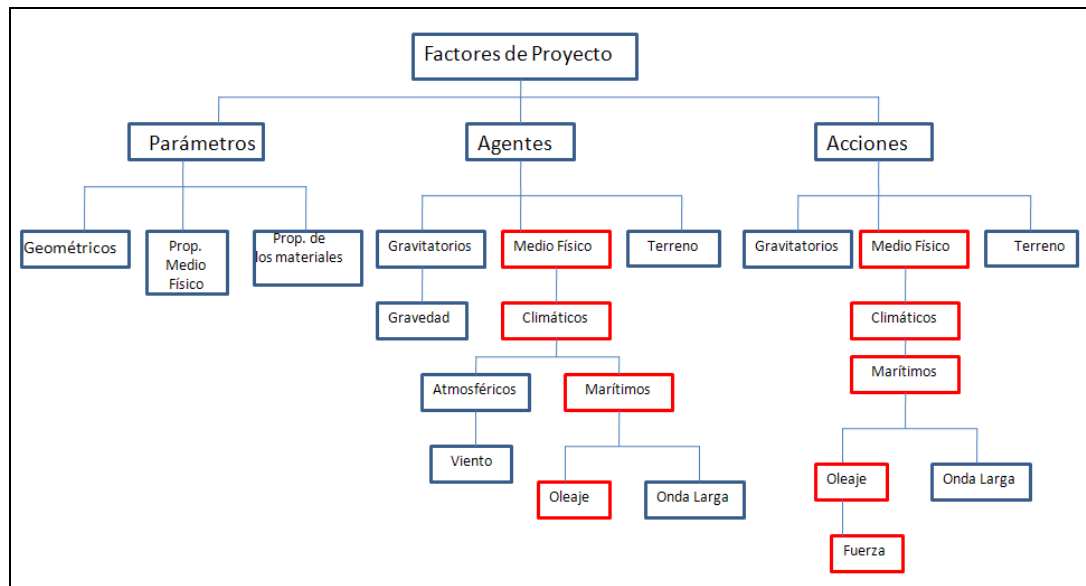


Figura 10. Ordenación de los factores de Proyecto según ROM 0.0

3.5.1 PARÁMETROS

Los parámetros de proyecto se refieren a la caracterización del tramo de obra mediante las variables geométricas, las propiedades del medio físico y del terreno y las variables referidas a los materiales de construcción, que para el tramo considerado son:

- Geométricos
 - Emplazamiento: El tramo I, Muelle Cabezo tiene una orientación NW.

- Longitud: 70[m]
- Ancho: 12.96[m]
- Cota de coronación: +5.2[m] NRS

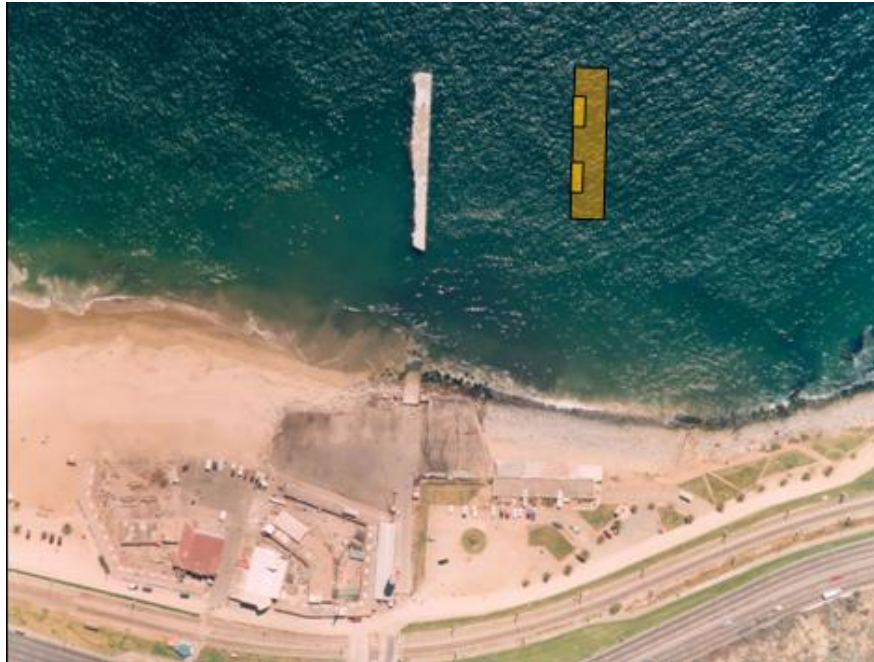


Figura 11. Disposición del Tramo I Muelle Cabezo. Fuente: Ref.6.

- Parámetros del medio físico
 - Parámetros de estado:
 - Peso específico del agua: 1025[Kg/m³].
 - Peso específico del aire: 1225[Kg/m³].
 - Parámetros mecánicos:
 - Viscosidad cinemática del agua: 10⁻⁶[m²/s].
- Parámetros del terreno:
 - Del informe geotécnico se extrae la siguiente información:

- Los suelos detectados en el tramo I, Muelle Cabezo, corresponden a arenas y arenas limosas, de compacidad media a baja en los primeros 2 a 3 metros bajo el fondo marino (S.P.T. o N entre 8 y 38) para continuar luego con compacidades muy altas a altas (N variable entre $N_{min}=62$ y $N_{max}=145$). (Ref.7)

3.5.2 AGENTES

Como se propuso en la introducción a este capítulo, se considera el agente oleaje que pertenece a los llamados agentes del medio físico, entre otros, como agente predominante (Figura 10).

La fuente de información sobre oleaje disponible en el área cercana a la Bahía de Valparaíso procede de datos obtenidos a partir de un modelo *hindcast* de tercera generación, que considera la generación de olas en todo el Océano Pacífico desde 1985 al 2004 (Proyecto “Olas Chile” desarrollado por el SHOA y Baird & Associates S.A.). (Ref.17)

En este trabajo, se analizan 4 años que van desde el 1 de Enero de 2000 a las 00:00 horas, hasta el 31 de Diciembre de 2004 a las 21:00 horas, y se utiliza la siguiente información de cada estado de mar para el análisis del régimen medio y de temporales:

- Altura de ola significativa espectral $H_{m0}[m]$
- Período de pico espectral $T_p[s]$
- Dirección media de procedencia $DirM[^\circ]$

Una vez obtenido el régimen de temporales, es posible realizar la propagación hacia la costa. Finalmente, se obtiene para cada estado de mar, la secuencia de olas individuales de altura H y período T mediante una simulación de Monte Carlo suponiendo que éstas siguen la distribución de Longuet-Higgins (1975-1983).

El estudio del agente oleaje se encuentra en el [ANEXO 3](#)

3.5.3 ACCIONES

Como resultado de su interacción con la obra, las oscilaciones del mar producen una fuerza sobre los pilotes, que podría desequilibrar la estructura produciendo el fallo de la misma.

Con carácter general, estas acciones dependen de la dimensión D de los obstáculos que se encuentran las oscilaciones en relación con la longitud de onda, L , de las mismas, y de la separación relativa entre obstáculos, S/D .

Para el muelle Cabezo, el valor de S/D es del orden de $14 > 5$ por lo que puede considerarse que la acción del oleaje sobre un pilote no interfiere con lo que ocurre con los demás, es decir, las fuerzas sobre cada pilote pueden estudiarse como si éstos estuvieran aislados.

Por otro parte, la dimensión relativa de cada pilote D/L es aproximadamente $0.003 < 0.05$, lo que indica que se trata de un elemento de pequeño volumen en el que la acción del oleaje proviene de (1) formación de vórtices y estelas que crean gradientes a un lado y a otro de la estructura y se concreta en las fuerzas de arrastre y sustentación, y (2) de la variación temporal del campo de velocidades que se manifiesta en fuerzas de inercia.

Puede usarse, por tanto, la ecuación de Morison et al. (1950) para calcular la distribución de fuerzas a lo largo de cada pilote. Los fundamentos teóricos de la ecuación de Morison et al. (1950) se encuentran en el ANEXO 4.

3.6 MODO DE FALLO PÉSIMO ADSCRITO A UN ESTADO LÍMITE ÚLTIMO

Dentro de los modos de fallo pésimo se encuentran: pérdida del equilibrio estático, deformación, ó colapso progresivo, entre otros. En este proyecto se considera el modo de fallo pésimo ***Pérdida del equilibrio estático*** adscrito a un estado límite último. Para estudiar la fiabilidad de la obra frente a este modo de fallo, es necesario calcular para cada ola individual, la distribución de fuerzas en cada pilote mediante la ecuación de Morison et al. (1950), teniendo en cuenta que la fuerza depende de la fase de la onda y por lo tanto varía a lo largo de un período según la posición de los pilotes en relación a unos ejes de referencia.

El análisis correcto precisaría la programación de los cálculos estructurales o la utilización de un software específico. Sin embargo, puesto que este trabajo pretende ilustrar la metodología de la ROM 0.0, y la verificación del modo de fallo por técnicas de nivel III, se realiza un cálculo simplificado de los pilotes tomando como valor de la fuerza, el máximo que propone la ecuación de Morison et al.(1950) en un período de onda.

Se considera que:

- La única fuerza que contribuye al fallo es la acción del oleaje sobre la estructura.

- La carga lateral admisible para cada pilote es de 6[ton]. Esta información es proporcionada en el Informe “*Reconocimiento del suelo de fundación construcción obras caleta Portales, Valparaíso, V Región*” (Ref.7), llevado a cabo por ARCADIS Geotecnia.

Lo que permite describir el modo mediante la siguiente ecuación de verificación escrita en formato **Margen de Seguridad**.

$$S = F_{H,adm} - F_H$$

Donde $F_{H,adm}$ es la fuerza horizontal admisible de cada pilote y F_H es la fuerza horizontal inducida por una ola individual, y cuyo cálculo se realiza mediante la ecuación de Morison et al. (1950).

3.7 VERIFICACIÓN DEL TRAMO I EN LA VIDA ÚTIL

El modo de fallo propuesto para su análisis se verifica durante la fase de proyecto, vida útil de la obra, utilizando un método de nivel III basado en simulaciones de Monte Carlo.

Puesto que la vida útil de la obra es una secuencia de ciclos de sollicitación, temporales, seguidos de períodos de calma, y únicamente es esperable el fallo de la obra para estados de mar cuyo contenido energético supera un determinado umbral, se propone simular con técnicas de Monte Carlo los ciclos de sollicitación y considerarlos como una sucesión de estados de mar de aproximadamente 3h. de duración. Para cada uno de estos estados de mar se simula la secuencia de olas individuales para las que se realiza la verificación mediante la ecuación anterior.

3.7.1 ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS DEL CLIMA MARÍTIMO.

Para la simulación de temporales durante la vida útil de la obra mediante técnicas de Monte Carlo, es preciso conocer las funciones de distribución conjunta de las variables aleatorias climáticas. Para ello se requiere analizar las curvas de estado durante un período de tiempo que debe ser al menos de la misma longitud que el período a simular.

Para este trabajo se dispone de las curvas de estado de cuatro años medidos en el nodo de Valparaíso situado en las coordenadas Long. -72° y Lat. -33° a una profundidad de 1600[m]. Los datos incluyen los valores de altura de ola espectral, período de pico y dirección media entre otros,

medidos cada tres horas desde el 1 de Enero de 2000 a las 00 horas hasta el 31 de Diciembre de 2004 a las 21 horas.

El régimen de temporales se ha obtenido utilizando el método de picos sobre un umbral, conocido como POT por sus siglas en inglés.

Para este trabajo lo ideal sería analizar un mínimo de 15 años de datos, pero a falta de una base de datos más completa, se utilizarán los cuatro años disponibles en el nodo de Valparaíso.

Se define un temporal como el suceso durante el cual el contenido energético del oleaje, medido a través del valor de la altura de ola significativa supera un determinado umbral $H_{s,max} = 4(m)$. A partir de esta definición se obtienen las funciones de distribución de las siguientes variables aleatorias:

- Números de temporales que se pueden presentar durante la vida útil de la obra, n_j
- Duración de cada temporal, D_t
- Altura de ola significativa máxima del temporal, $H_{s,max}$
- Período de pico, T_p
- Dirección de oleaje, θ_m

La Figura 12 muestra la metodología que se utiliza en este trabajo para la simulación de temporales durante la vida útil.

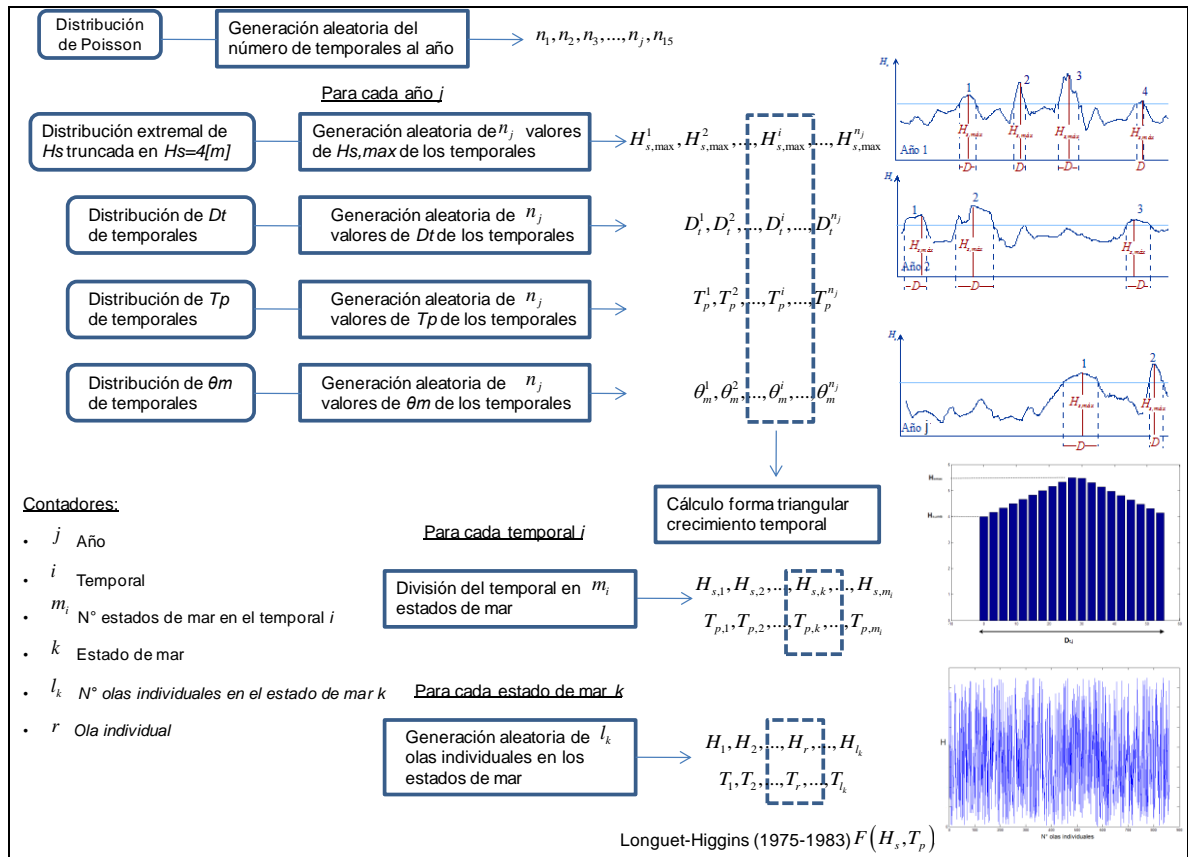


Figura 12. Esquema simulación durante la vida útil

3.7.1.1 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN NÚMERO DE TEMPORALES

Se ha considerado que el número de temporales en un año sigue una distribución de Poisson de parámetro λ . El número medio de temporales al año, $\lambda = 83/4 = 20.75$. Su función de densidad es, por tanto:

$$P(n) = e^{-\lambda} \frac{\lambda^n}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Donde n representa el número de temporales.

3.7.1.2 DISTRIBUCIÓN DE LA ALTURA DE OLA SIGNIFICANTE MÁXIMA DEL TEMPORAL

Para estudiar la función de distribución de la variable aleatoria altura de ola significativa máxima del temporal, se ha dibujado la distribución empírica en un papel probabilístico asociado a una familia paramétrica de funciones de distribución, y se ha analizado su ajuste a distribuciones de Gumbel, Weibull y Frechet de máximos, cuyas expresiones son:

$$\text{Frechet de Máximos} \quad F(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\left(\frac{\delta}{x-\lambda}\right)^\beta\right)$$

$$\text{Gumbel de Máximos} \quad F(x) = P(X \leq x) = \exp\left[-\exp\left(-\left(\frac{x-\lambda}{\delta}\right)\right)\right]$$

$$\text{Weibull de Máximos} \quad F(x) = P(X \leq x) = \exp\left(-\left(\frac{\lambda-x}{\delta}\right)^\beta\right)$$

El mejor ajuste se obtiene para la función de distribución de Frechet con valores de los parámetros:

$$\lambda = 4.3327 \quad \delta = 12.7394 \quad \beta = 0.01$$

La Figura 13 muestra el ajuste de los datos a una función de distribución Frechet:

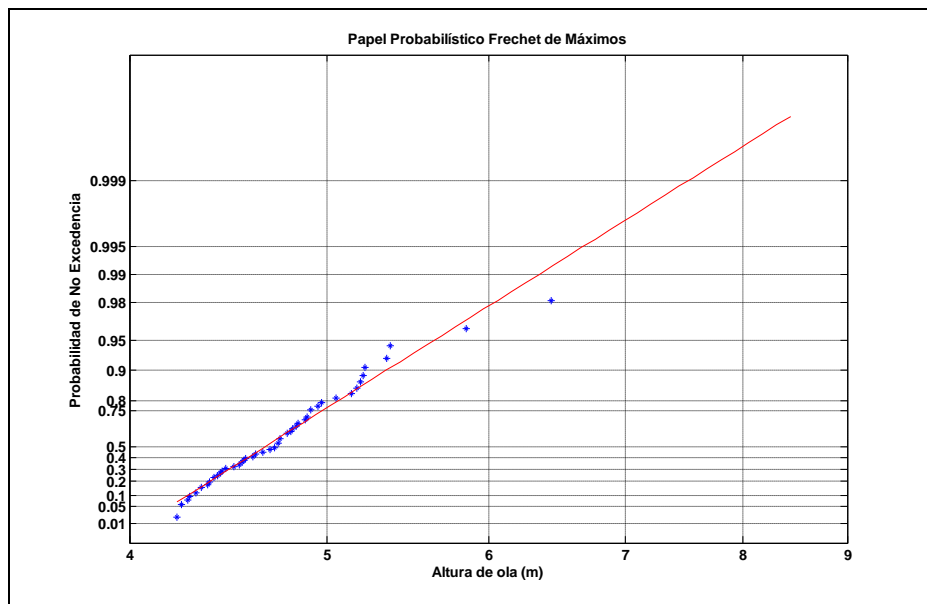


Figura 13. Ajuste de la variable aleatoria altura de ola a una función de máximos, Frechet

Se han analizado asimismo las funciones de distribución de las variables:

- Período de pico, T_p .
- Dirección media del oleaje, θ_m .
- Duración del temporal, D_t .

Las Figura 14, Figura 15 y Figura 16 representan a modo de ejemplo, las funciones de densidad de T_p , θ_m y D_t , y sus correspondientes ajustes

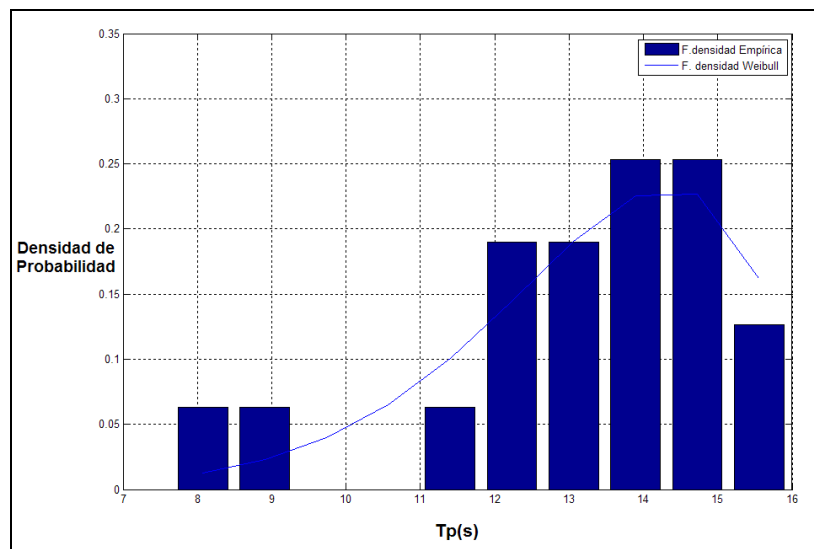


Figura 14. Función de densidad de probabilidad empírica, y ajuste a una distribución Weibull, $\delta = 2.05$ y $\lambda = 12.85$.

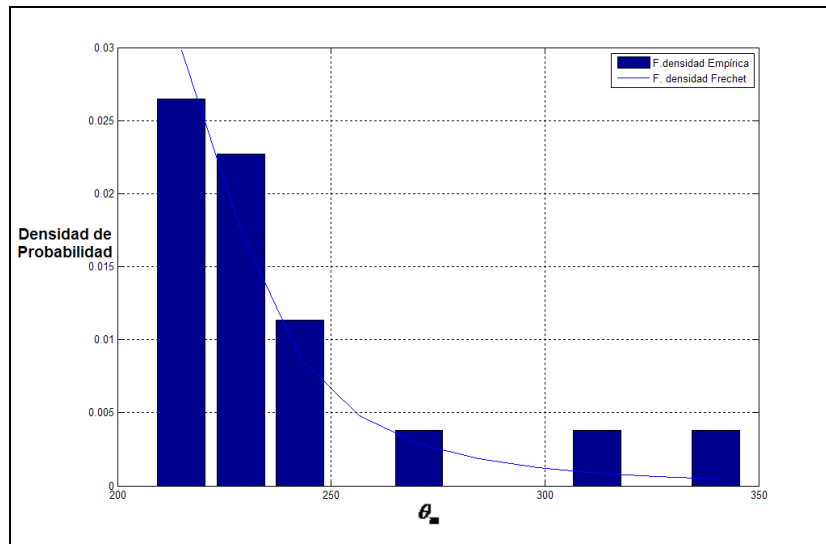


Figura 15. Función de densidad de probabilidad empírica, y ajuste a una distribución Frechet, $\beta = 0.53$
 $\delta = 13.96$ y $\lambda = 220.13$.

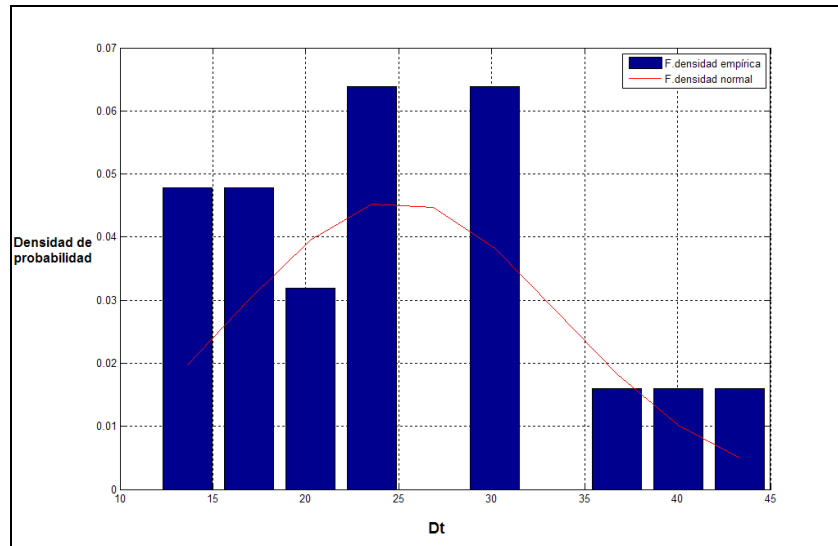


Figura 16. Función de densidad de probabilidad empírica, y ajuste a una distribución Normal, $\delta = 8.72$ y
 $\lambda = 24.94$.

3.7.2 SIMULACIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO DURANTE LA VIDA ÚTIL.

Conocidas las funciones de distribución de las variables de interés, el procedimiento de simulación de los ciclos de sollicitación durante la vida útil de la obra es el siguiente (Figura 12):

- Simulación del número de temporales para cada uno de los quince años simulados:

$$n_j \quad j = 1, 2, \dots, 15$$

- Para cada temporal i , $i = 1, 2, \dots, n_1 + n_2 + \dots + n_{15}$
 - Simulación de la altura de ola máxima del temporal $H_{s,\max}^i$ utilizando la función de distribución de la variable aleatoria $H_{s,\max}$.
 - Simulación de la duración del temporal D_t^i , a partir de la función de distribución de la variable aleatoria D_t .
 - Simulación del período de pico del temporal T_p^i a partir de la función de distribución de la variable aleatoria T_p .
 - Simulación de la dirección media del temporal θ_m^i a partir de la función de distribución de la variable aleatoria θ_m .

Con estos datos, se admite de forma simplificada que la altura de ola significativa máxima del temporal se alcanza a mitad del mismo, y tiene una forma triangular, tal y como se describe en la Figura 17:

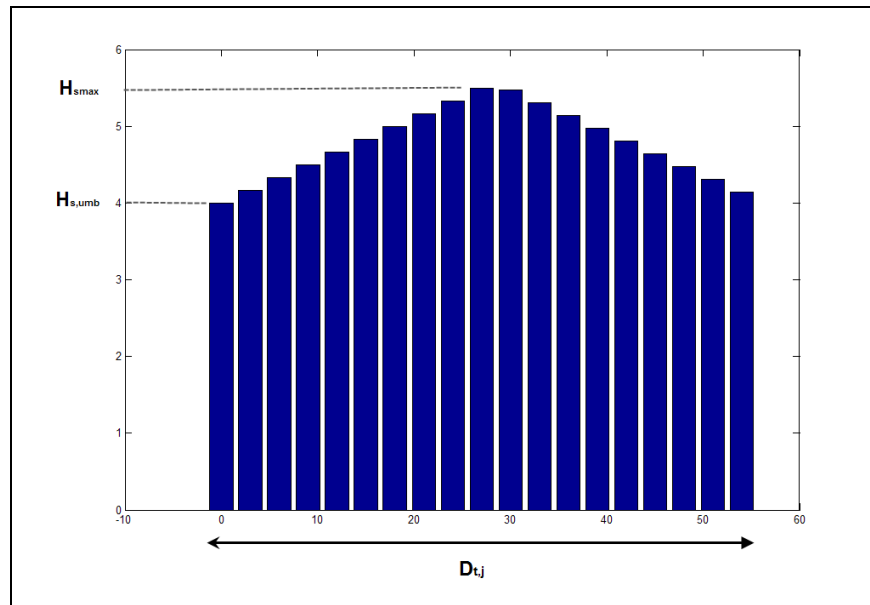


Figura 17. Estructura triangular de un temporal dividido en estados de mar de 3h.

El temporal así descrito se divide en estados de mar de 3 horas de duración, y para todos ellos se toman como valores del período de pico y duración media, los simulados T_p^i y θ_m^i .

Estos estados de mar generados se encuentran en aguas profundas, y por tanto es necesaria la propagación de los mismos hasta el emplazamiento de la obra marítima. Para ello se ha realizado previamente una propagación de estados de mar con valores de H_s, T_p y θ_m en los rangos $H_s \in [4,8]$, $T_p \in [7,17]$, $\theta_m \in [202.5,337.5]$, y se han utilizado los resultados para interpolar en los estados de mar simulados.

La Figura 18 muestra la comparación de los temporales simulados con los temporales obtenidos del nodo de Valparaíso, V Región:

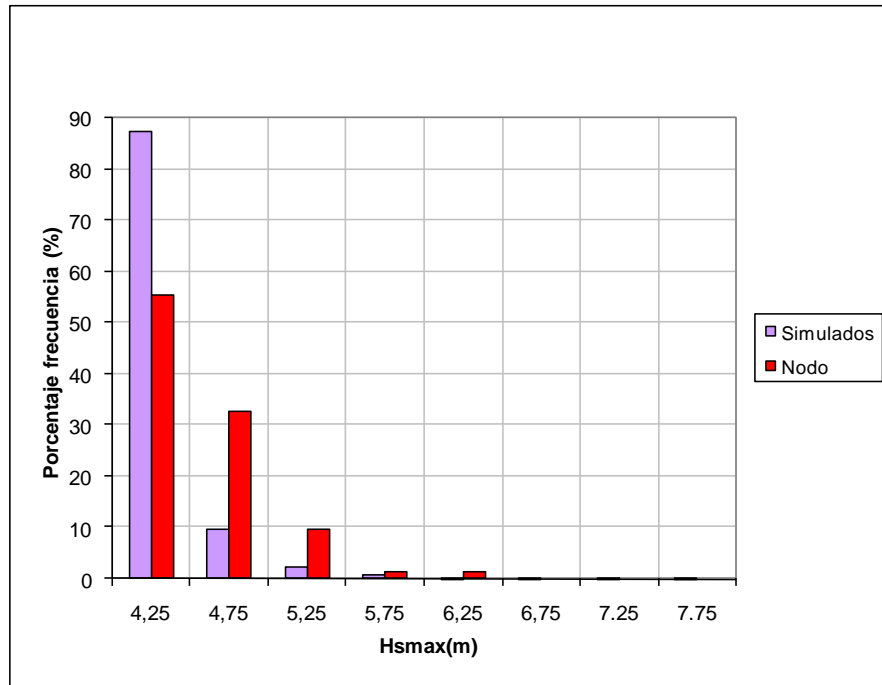


Figura 18. Histograma de altura de ola obtenida de la simulación y del régimen de temporales.

Una vez obtenidos los estados de mar en la zona de estudio, se obtiene para cada estado de mar, la secuencia de olas individuales de altura H y período T mediante una simulación de Monte Carlo suponiendo que éstas siguen la distribución de Longuet-Higgins (1975-1983) (Ref.14). Finalmente, para cada ola individual, la ecuación de Morison et al. (1950) (Ref.15 ,16) proporciona la distribución vertical de fuerzas.

3.7.3 RESULTADOS

Siguiendo el proceso de simulación expuesto, se ha obtenido una muestra de 100 elementos que representan cada uno una posible realización del clima más severo que puede solicitar la obra durante su vida útil. Para cada uno de ellos y para cada ola individual se han calculado los valores de la variable S que estima la diferencia entre la máxima fuerza horizontal admisible y la que ejerce la ola sobre el pilote.

La Figura 19 representa los valores obtenidos de la fuerza ejercida sobre el pilote para uno de los estados de mar. Puede observarse que para todas las olas, el orden de magnitud de la fuerza es muy inferior al de la máxima admisible de 6[ton].

Para ninguna de las olas individuales obtenidas en cada realización de la vida útil, se ha superado el valor máximo admisible por lo que puede considerarse que la probabilidad de fallo en la vida útil es despreciable. Es decir, se cumplen los requisitos de seguridad.

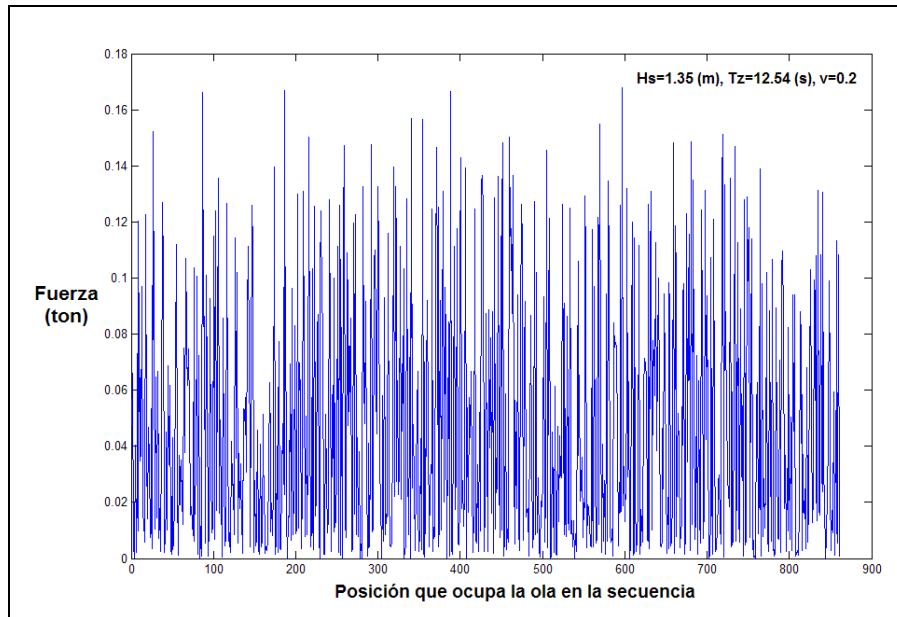


Figura 19. Cálculo de la fuerza en cada ola individual generada, correspondiente a un estado de mar.

4 CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha aplicado la metodología propuesta por la ROM 0.0 al tramo **Muelle Cabezo** de la obra muelle Caleta Portales (Valparaíso, V Región), para su verificación frente a la seguridad durante la vida útil de la obra.

Se analizaron los antecedentes y los objetivos del proyecto “Reposición de Infraestructura Marítima del Muelle Caleta Portales” llevado a cabo luego de la destrucción del muelle de Caleta Portales, ocurrido en el año 2000 por el mercante AVON.

Se evaluó el carácter general del tramo Muelle Cabezo en función de su repercusión económica, social y ambiental, en el caso que se produjera el modo de fallo principal, **Pérdida del equilibrio estático**. Se obtuvieron los factores de proyecto que se refieren a la identificación de los parámetros, agentes y acciones que interfieren en el tramo.

Dentro de los agentes, se consideró el agente oleaje, que pertenece a los llamados agentes del medio físico, entre otros, como agente predominante, y para su estudio se utilizó cuatro años de datos (del 1 de Enero de 2000 a las 00:00 horas, hasta el 31 de Diciembre de 2004 a las 21:00 horas) disponibles en el área cercana a la Bahía de Valparaíso. Estos datos fueron obtenidos de un modelo *hindcast* de tercera generación dentro del Proyecto “Olas Chile” desarrollado por el SHOA y Baird & Associates S.A.

A partir de las curvas de estados de mar de altura de ola significativa durante los cuatro años disponibles, se analizó el régimen de temporales utilizando el método de picos sobre un umbral, conocido como POT (Peaks Over Threshold). Para ello se definió como temporal, el suceso durante el cual el contenido energético del oleaje, superó un umbral de $H_{s,max} = 4(m)$. A partir de esta definición se obtuvieron las funciones de distribución de las variables aleatorias.

Para la verificación del modo de fallo pésimo durante la vida útil, se utilizó un método de nivel III, en el que se utilizaron las funciones de distribución halladas para simular con técnicas de Monte Carlo los ciclos de sollicitación, como una sucesión de estados de mar de aproximadamente 3h. de duración. Finalmente, para cada uno de los estados de mar se simuló la secuencia de olas individuales de altura H y período T del estado mediante una simulación de Monte Carlo suponiendo que éstas siguen la distribución de Longuet-Higgins (1975-1983).

Para cada ola individual, se calculó la fuerza que ejerce sobre un pilote, mediante la ecuación de Morison et al. (1950). El uso de esta ecuación queda justificado en que, para el tramo Muelle

Cabezo, la distancia relativa entre pilotes fuera de $S/D > 5$, y que la dimensión relativa de cada pilote D/L fuera menor que 0.05.(Ref.15)

La ecuación de verificación que describe el modo de fallo, se escribió en formato **Margen de Seguridad**, considerándose de forma simplificada, que se produce el fallo cuando la fuerza horizontal inducida por el oleaje es mayor que una fuerza horizontal admisible de 6ton. El valor de esta fuerza horizontal, fue calculada por ARCADIS Geotecnia, y se encuentra en el Informe “Reconocimiento del suelo de fundación construcción obras caleta Portales, Valparaíso, V Región” (Ref.7).

Para la verificación se realizaron 100 secuencias del clima marítimo más severo durante los quince años de vida útil de la obra, y para ninguna de ellas se produjo el fallo, es más, los valores del margen de seguridad obtenidos para las olas individuales fueron un orden de magnitud bastante inferior al valor máximo admisible, por lo que se considera que el tramo es seguro frente al fallo.

ANEXO 1. REFERENCIAS **BIBLIOGRÁFICAS**

- Ref.1: Revista Mar, Liga Marítima de Chile. Artículo *“Situación del Transporte Marítimo Internacional”*.
- Ref.2: Página Web www.armada.cl. Armada Actual, Chile: País Marítimo.
- Ref.3: Dirección de Obras Portuarias. *“Programa de mejoramiento de la gestión 2005. Sistema gestión territorial integrada. Informe Etapa II: Plan y Programa”*. Octubre 2005.
- Ref.4: Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Portuarias. *“Presentación Proyecto Portales, Reposición Infraestructura Marítima y Terrestre Caleta Portales”*.
- Ref.5: Dirección de Obras Portuarias, V región. *“Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sector Pesquero Artesanal Caleta Portales Valparaíso”*.
- Ref.6: Ministerio de Obras Públicas. *“Presentación Mesa de Trabajo Reposición Infraestructura Marítima Caleta Portales Valparaíso”*. Departamento de Proyecto, Dirección de Obras Portuarias Valparaíso, V Región.
- Ref.7: ARCADIS Geotecnia. *“Reconocimiento del suelo de fundación construcción obras caleta Portales, Valparaíso, V Región”*. Septiembre 2003.
- Ref.8: EROM 00. *“Procedimiento Metodológico Participativo y la Canalización, Recogida y Difusión de Estudios y Análisis Técnico-Científicos sobre los documentos del Programa ROM”*. Puertos del Estado, 2003.
- Ref.9: EROM 02. *“Procedimiento Metodológico Participativo para la Canalización, Recogida y Difusión de Estudios y Análisis Técnico-Científicos sobre los documentos del Programa ROM”*. Puertos del Estado, 2006.
- Ref.10: Losada R., Miguel A. *“Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias”*. Puertos del Estado, 2001.
- Ref.11: Castillo, Enrique. *“Análisis Estadístico de datos Extremos”*. Santander, 1995.
- Ref.12: Silva C. Rodolfo. *“Análisis y descripción estadística del oleaje”*. Instituto de Ingeniería UNAM, 2005.
- Ref.13: Benjamin Jack R., Cornell C. Allin. *“Probabilidad y Estadística en Ingeniería Civil”*. Editorial McGraw-Hill, 1981.

- Ref.14: Stanislaw R. Massel. *“Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction”*. Advance Series on Ocean Engineering Volume 11. Pag.172.
- Ref.15: Department of the Army Corps of Engineers. *“Shore Protection Manual”*. Coastal Engineering Research Center, 1975. Volumen II.
- Ref.16: Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple. *“Water Wave Mechanics for Enginners and Scientists”*. Advanced Series on Ocean Engineering. Volumen II.
- Ref.17: Baird & Associates S.A. *“Proyecto Olas Chile”*. SHOA y Baird & Associates S.A.
- Ref.18: Lizano Omar et al. (2001). *“Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México”*. Top. Meteor. Oceanog.,8(1):40-49,2001.
- Ref.19: W. Erick Rogers et al. (2007). *“Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight”*. Coastal Engineering 54: 1-15.

ANEXO 2. DEFINICIONES

A continuación se establece una serie de definiciones que se utilizan a lo largo del proyecto. Estas definiciones se extraen de la ROM 0.0, Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias.

Parámetros: Conjunto de variables que caracterizan, en un determinado emplazamiento y en un determinado intervalo de tiempo, la geometría de la construcción y del terreno, las propiedades del medio, del terreno y de los materiales de construcción.

Agente: Todo aquello que puede ejercer o producir en o sobre la obra y su entorno, efectos significativos para su seguridad y su servicio.

Acción: Es cualquier efecto que un agente puede producir en la obra y su entorno como resultado de su mutua interferencia.

Factores de proyecto: Conjunto de parámetros, agentes y acciones.

Tramo de obra: Es el conjunto de partes de la obra que cumplen solidariamente una función específica. Se encuentran sometidos a los mismos niveles de acción de los agentes actuantes y forman parte de la misma tipología formal y estructural.

Condicionantes de Proyecto: El proyecto de un tramo trata de responder a los condicionantes de proyecto, entre los que se incluyen, la ubicación espacial (emplazamiento) y temporal (fase de proyecto), los requisitos de explotación, la geometría del tramo y del terreno, las propiedades (parámetros) del medio físico y de los materiales, los agentes que pueden interferir con la obra y el entorno, y sus acciones.

Intervalo de tiempo: Marco temporal en el que se describen, clasifican, seleccionan y determinan los parámetros de proyecto, los agentes y las acciones, y se verifica su seguridad, el servicio y explotación.

Estado: Intervalo de tiempo en el que puede admitirse que cualquier manifestación de los factores de proyecto es estacionaria en sentido estadístico.

Estado Límite: Estado de proyecto en el cual, la obra en su conjunto, o alguno de sus tramos o elementos, queda fuera de servicio por incumplimiento de los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación especificados en el proyecto. Los estados límites se clasifican en últimos ELU, de servicio, y operativos ELO.

Ciclo de solicitud: Es una secuencia de estados que comienza desde el instante en el que el valor del descriptor estadístico que representa el estado supera cierto umbral hasta que, transcurrido cierto tiempo, es inferior a él.

Modo de fallo: Forma o mecanismo, geométrico, físico, mecánico, químico o biológico, por el cual la obra o algunos de sus elementos, queda fuera de servicio por causas estructurales. Para su comprobación, los modos de fallo se adscriben a los estados límite último o de servicio. Una vez ocurrido un modo de fallo, los requisitos estructurales, formales y de explotación del tramo de obra sólo se recuperan mediante su reparación o reconstrucción.

Seguridad: Un tramo de obra se considera seguro cuando cumple los requisitos de seguridad especificados en el proyecto y exigidos por la normativa vigente durante la ocurrencia de todos los estados que pueden presentarse en las fases de proyecto.

Servicio: Un tramo de obra está en servicio cuando cumple los requisitos funcionales (resistentes y formales) especificados en el proyecto y exigidos por la normativa vigente durante la ocurrencia de todos los estados que pueden presentarse en las fases de proyecto.

Uso y explotación: Una obra o tramo y sus instalaciones están en explotación cuando cumplen los requisitos de uso especificados en el proyecto y los exigidos por la norma vigente.

Probabilidad de Fallo: La probabilidad de que un tramo incumpla los requisitos de seguridad en un intervalo de tiempo mediante la ocurrencia de un modo de fallo, se denomina genéricamente probabilidad de fallo.

Fiabilidad: Es el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a todos los modos principales, adscritos a todos los estados límites últimos.

Funcionalidad: Es el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a todos los modos principales, adscritos a todos los estados límite de servicio.

Operatividad: Es el valor complementario de la probabilidad de parada en la fase de proyecto frente a todos los modos de parada principales adscritos a todos los estados límite de parada.

ANEXO 3. ESTUDIO DE **OLEAJE**

3.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se realiza la descripción del agente del medio físico oleaje, que se enmarca dentro del análisis de los factores que interfieren en el proyecto, y que forman parte de los condicionantes de proyecto.

3.2 FUENTE DE DATOS

La información disponible de oleaje en aguas profundas próximas a las costas de Valparaíso corresponde a la base de datos desarrollada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA y Baird & Associates S.A., bajo el proyecto “Olas Chile 2002” y que posteriormente fue actualizada en el proyecto “Olas Chile versión II, 2005”. Los datos se obtienen como resultado de la aplicación del modelo WAVAD a datos de viento oceánico costa afuera de Valparaíso, y su validación en 22 puntos con las mediciones de olas que existen en Chile, de boyas del SHOA (TriAXYS en Valparaíso), de la NOAA y datos satelitales (Ref.17).

La Figura 20 muestra la ubicación del nodo en Valparaíso, V Región. La parte izquierda de la figura muestra los puntos de validación utilizados en el proyecto Olas Chile, y la parte derecha de la figura muestra en detalle la ubicación del nodo en relación con la Bahía de Valparaíso.

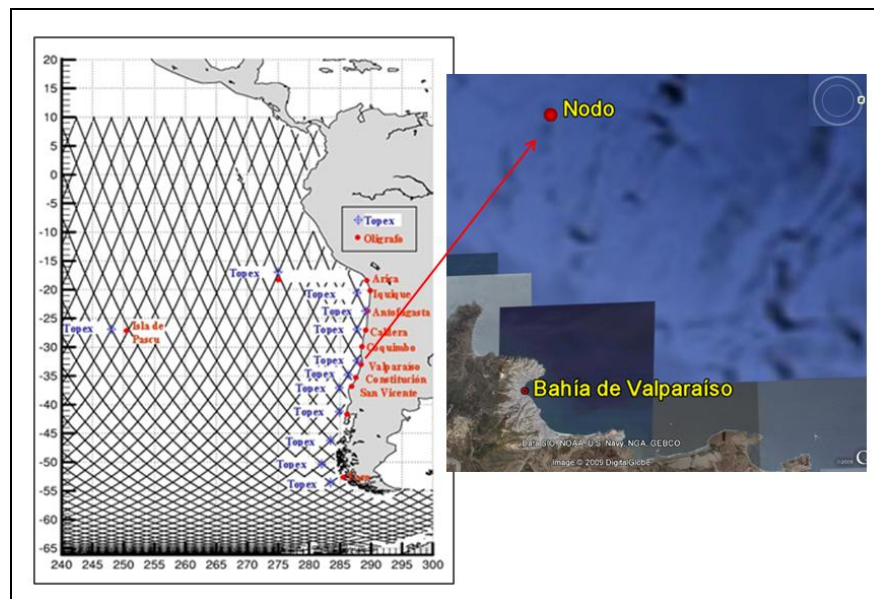


Figura 20. Ubicación del nodo de Valparaíso correspondiente a la base de información utilizada.

Para el estudio del oleaje en la zona de estudio se utilizan cuatro años de datos (del 1 de Enero de 2000 a las 00:00 horas, hasta el 31 de Diciembre de 2004 a las 21:00 horas) del nodo de Valparaíso medidos cada 3 horas (ver Figura 20) que forman parte de la base de datos de la carrera Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso comprados para fines académicos.

El nodo está situado en las coordenadas Long. -72° y Lat. -33° a una profundidad de 1600 [m]. y se dispone de los siguientes datos:

- Altura de ola significativa espectral H_{m0} [m]
- Período de pico espectral T_p [s]
- Dirección media de procedencia $DirM$ [$^{\circ}$]

3.3 RÉGIMEN MEDIO

Utilizando la información disponible, se han caracterizado los parámetros de oleaje en aguas profundas a través de histogramas, gráficos de dispersión, y tablas de frecuencias.

Los histogramas de altura de ola espectral (Figura 21), período de pico (Figura 22), y dirección media de oleaje (Figura 23), se construyeron con los siguientes intervalos: altura de ola en intervalos de 0.5[m], para los períodos, en intervalos de 2[s], y para las direcciones en intervalos de 22.5° .

Se observa que las alturas de ola predominantes están entre 1.5[m] y 4[m]. Los períodos varían entre los 11[s] y 15[s] y las principales componentes provienen del sector SSW y WSW.

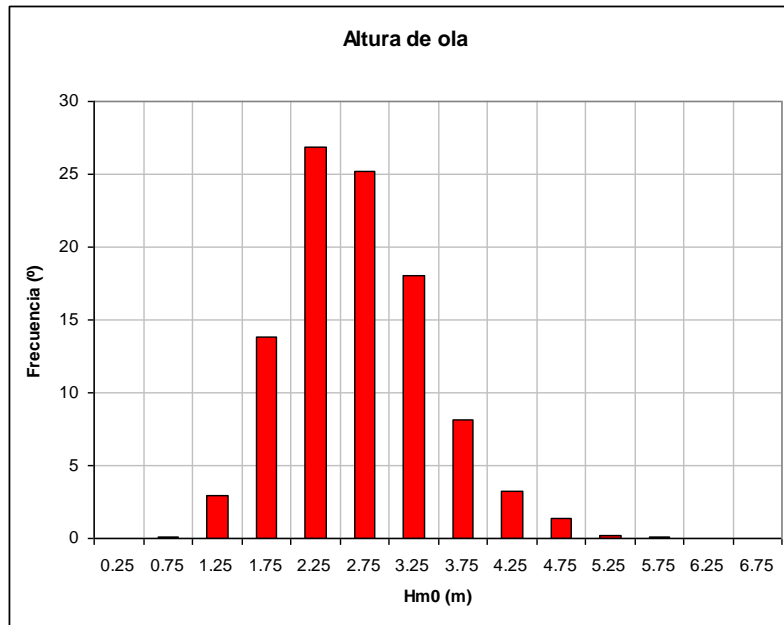


Figura 21. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de H_{m0} .

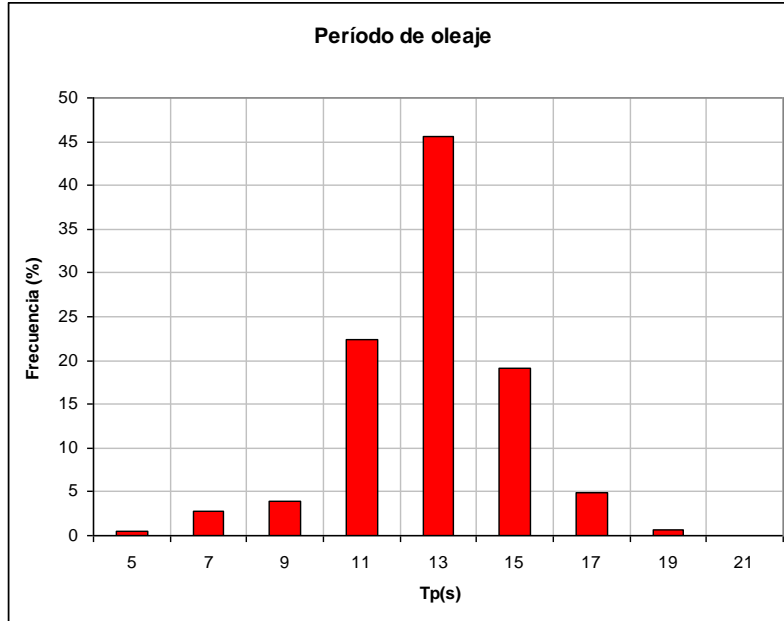


Figura 22. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de T_p .



Figura 23. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de DirM.

Para observar el comportamiento de los parámetros en forma conjunta de altura de ola v/s período, altura de ola v/s dirección y período v/s dirección, se han confeccionados gráficos de dispersión y tablas de frecuencias. Se observa en la Figura 24 que para alturas de ola de 1 a 4[m] hay una gran concentración de períodos de 8 a 18[s], y a medida que la altura de ola aumenta también lo hacen los períodos.

La Figura 25 muestra que la mayor parte de los datos (más del 90% de los datos) se concentran en los sectores S y WSW seguida de las dirección W hasta NNW para alturas de olas comprendidas entre 1[m] hasta aproximadamente los 5[m]. A partir de los 4[m] de altura de ola ya no se encuentran datos con direcciones provenientes del primer y segundo cuadrante, y se observa que para alturas de ola mayores que 5[m], las direcciones de oleaje se ubican entre SSW y WSW y en una menor proporción se encuentran entre el W y el NNW.

La Tabla 8 muestra los porcentajes de presentación de la altura de ola H_{m0} y período de ola, por intervalos de 0.5[m] y 2[s].

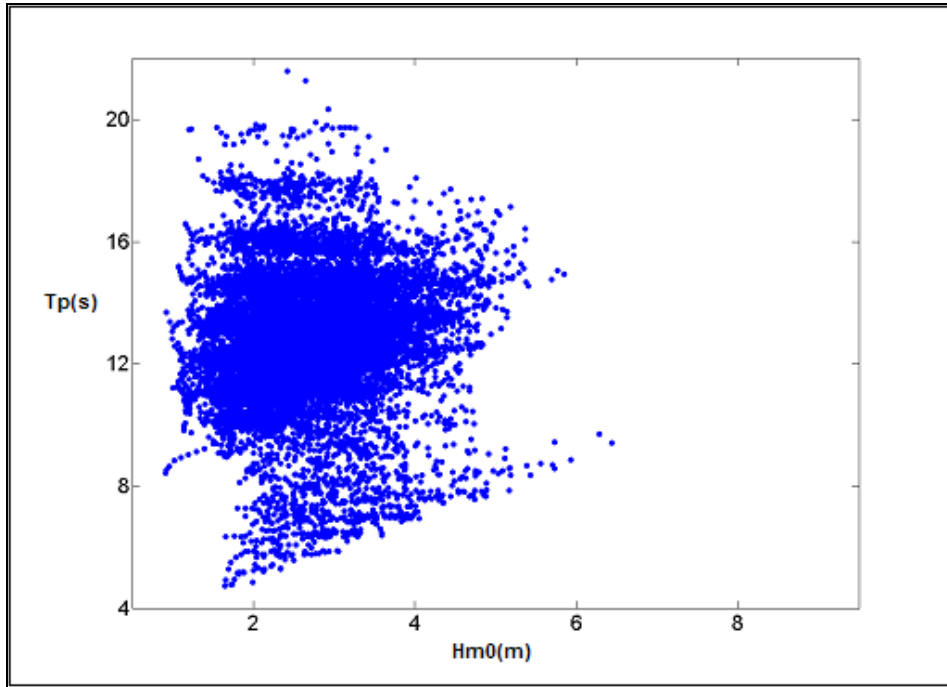


Figura 24. Gráfico de dispersión H_{m0} v/s T_p .

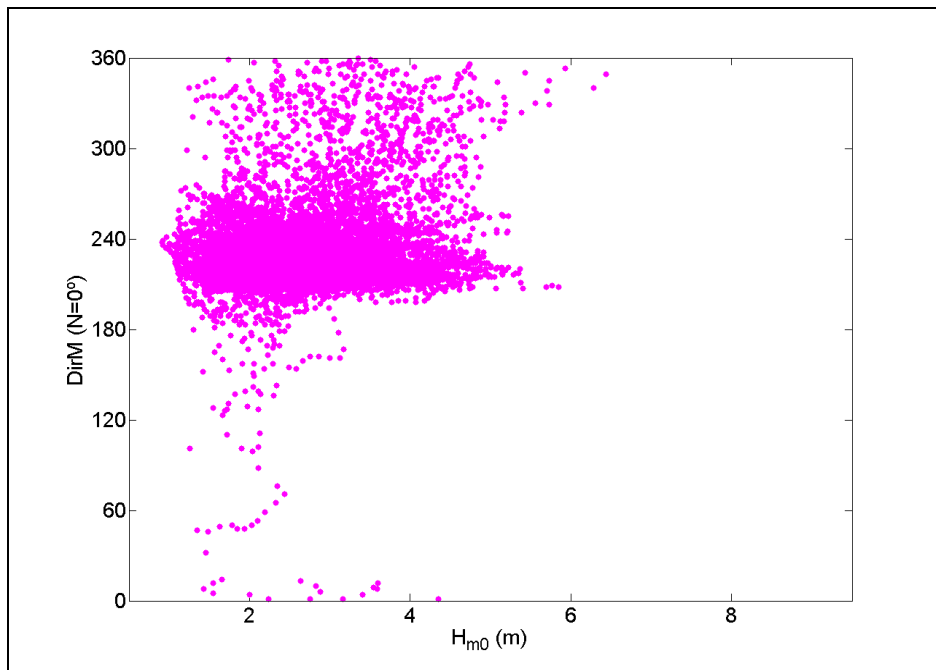


Figura 25. Gráfico de dispersión H_{m0} v/s $DirM$

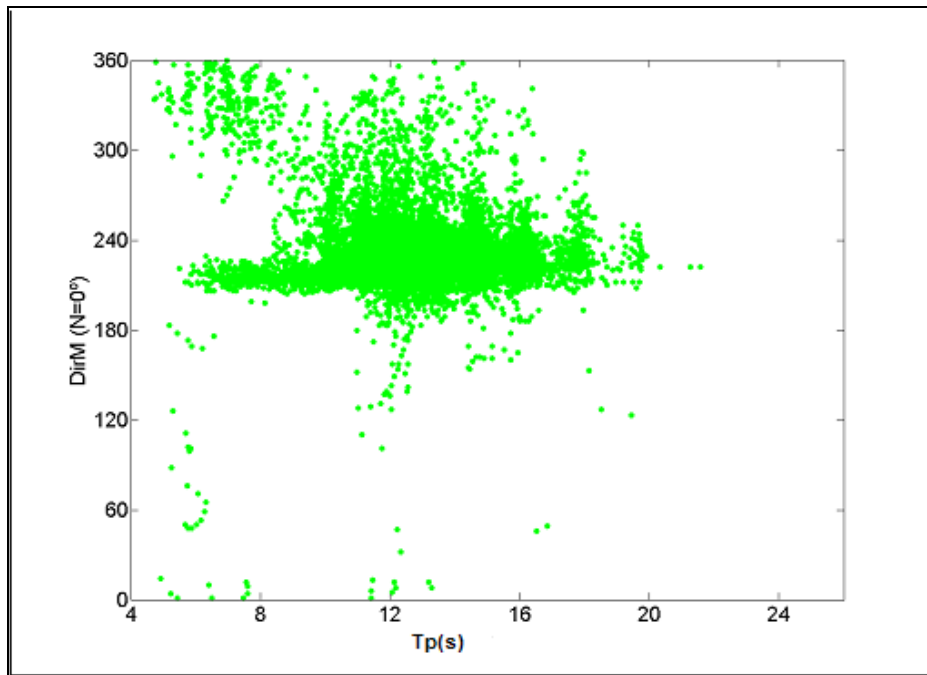


Figura 26. Gráfico de dispersión Tp v/s DirM

Altura de ola Hm0 - Período Tp (%)											
Hm0(m)	Período de pico Tp (s)									TOTAL	
	4.0-6.0	6.0-8.0	8.0-10.0	10.0-12.0	12.0-14.0	14.0-16.0	16.0-18.0	18.0-20.0	20.0-22.0		
0.0-0.5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0.5-1.0	0,000	0,000	0,021	0,000	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048
1.0-1.5	0,000	0,000	0,062	1,054	1,177	0,376	0,116	0,034	0,000	0,000	2,819
1.5-2.0	0,130	0,082	0,616	4,351	5,316	1,970	0,807	0,178	0,000	0,000	13,450
2.0-2.5	0,226	0,520	0,807	7,458	11,570	4,317	1,710	0,192	0,007	0,000	26,807
2.5-3.0	0,080	0,760	0,862	5,330	13,164	3,968	1,019	0,144	0,014	0,000	25,341
3.0-3.5	0,014	0,609	0,766	2,614	8,819	4,495	0,828	0,103	0,000	0,000	18,248
3.5-4.0	0,000	0,479	0,438	1,033	3,674	2,429	0,212	0,007	0,000	0,000	8,272
4.0-4.5	0,000	0,192	0,144	0,301	1,519	1,006	0,116	0,007	0,000	0,000	3,285
4.5-5.0	0,000	0,103	0,116	0,096	0,424	0,513	0,164	0,000	0,000	0,000	1,416
5.0-5.5	0,000	0,007	0,062	0,000	0,034	0,116	0,034	0,000	0,000	0,000	0,253
5.5-6.0	0,000	0,000	0,034	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,055
6.0-6.5	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014
6.5-7.0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,450	2,752	3,941	22,237	45,725	19,211	5,006	0,665	0,021	0,000	100,00

Tabla 8. Tabla de incidencia Altura de ola Hm0 v/s período Tp.

Se tiene que el 91% de los datos tienen altura de ola entre 1[m] a 4[m] y los períodos más probables se concentran entre 8 y 18[s].

La Tabla 9 muestra, para cada sector de procedencia del oleaje su porcentaje de ocurrencia. Las direcciones se han clasificado en intervalos de 22.5°, y se observa efectivamente que los oleajes

más probables proceden del SSW, SW y WSW, sectores en los que se concentran más del 90% de los datos. La Tabla 10 resume los porcentajes de concentración para los diferentes intervalos de alturas de ola y dirección de oleaje. Finalmente, la Tabla 11 resume los porcentajes de presentación para los diferentes intervalos de período de pico y dirección de procedencia del oleaje.

DIRECCION	SECTOR DE PROCEDENCIA	% DE OCURRENCIA
N	348.75° < θ ≤ 11.25°	0,00
NNE	11.25° < θ ≤ 33.75°	0,04
NE	33.75° < θ ≤ 56.25°	0,06
ENE	56.25° < θ ≤ 78.75°	0,03
E	78.75° < θ ≤ 101.25°	0,03
ESE	101.25° < θ ≤ 123.75°	0,03
SE	123.75° < θ ≤ 146.25°	0,09
SSE	146.25° < θ ≤ 168.75°	0,14
S	168.75° < θ ≤ 191.25°	0,39
SSW	191.25° < θ ≤ 213.75°	11,15
SW	213.75° < θ ≤ 236.25°	65,63
WSW	236.25° < θ ≤ 258.75°	14,42
W	258.75° < θ ≤ 281.25°	3,35
WNW	281.25° < θ ≤ 303.75°	1,65
NW	303.75° < θ ≤ 326.25°	1,34
NNW	326.25° < θ ≤ 348.75°	1,25

Tabla 9. Porcentaje de ocurrencia para las diferentes direcciones.

Hm0(m)	Altura de ola Hm0 - Dirección media (%)																TOTAL
	DirM(°)																
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
0.0-0.5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0.5-1.0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048
1.0-1.5	0,000	0,007	0,014	0,000	0,007	0,000	0,000	0,007	0,014	0,349	1,642	0,595	0,116	0,014	0,007	0,041	2,813
1.5-2.0	0,000	0,014	0,027	0,000	0,007	0,014	0,048	0,034	0,151	1,320	8,450	2,306	0,712	0,157	0,110	0,089	13,439
2.0-2.5	0,000	0,000	0,014	0,027	0,014	0,014	0,041	0,055	0,212	2,696	18,972	3,722	0,438	0,233	0,151	0,178	26,767
2.5-3.0	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,000	2,928	17,440	3,633	0,616	0,219	0,192	0,178	25,240
3.0-3.5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,014	1,977	12,158	2,395	0,759	0,390	0,226	0,205	18,145
3.5-4.0	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,238	4,659	1,033	0,390	0,356	0,253	0,239	8,182
4.0-4.5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,465	1,444	0,513	0,246	0,198	0,260	0,144	3,270
4.5-5.0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,130	0,718	0,157	0,075	0,082	0,096	0,123	1,381
5.0-5.5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,116	0,048	0,000	0,000	0,041	0,021	0,247
5.5-6.0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,048
6.0-6.5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,007
6.5-7.0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TOTAL	0,000	0,042	0,055	0,027	0,028	0,028	0,089	0,144	0,391	11,145	65,626	14,423	3,352	1,649	1,336	1,252	99,587

Tabla 10. Tabla de incidencia Altura de ola Hm0 v/s Dirección media DirM.

Tp(s)	Período Tp - Dirección media(%)																TOTAL
	DirM(°)																
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
4.0-6.0	0,062	0,007	0,021	0,007	0,021	0,014	0,007	0	0,027	0,021	0,027	0	0	0,007	0,041	0,185	0,447
6.0-8.0	0,253	0,007	0,014	0,021	0	0	0	0,007	0,007	0,499	0,930	0,000	0,021	0,096	0,363	0,534	2,752
8.0-10.0	0,027	0	0	0	0	0	0	0	0	0,807	2,011	0,376	0,212	0,226	0,144	0,137	3,94
10.0-12.0	0,021	0,007	0	0	0,007	0,007	0,048	0,007	0,096	2,032	13,910	3,818	1,266	0,568	0,274	0,178	22,239
12.0-14.0	0,041	0,021	0,007	0	0	0	0,027	0,055	0,157	5,795	30,993	6,486	1,095	0,541	0,369	0,137	45,724
14.0-16.0	0,014	0	0	0	0	0	0	0,068	0,068	1,587	14,074	2,484	0,568	0,171	0,109	0,068	19,211
16.0-18.0	0	0	0,014	0	0	0	0	0	0,034	0,335	3,257	1,115	0,171	0,034	0,034	0,014	5,008
18.0-20.0	0	0	0	0	0	0,007	0,007	0,007	0	0,068	0,404	0,144	0,021	0,007	0,000	0,000	0,665
20.0-22.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,021
TOTAL	0,418	0,042	0,056	0,028	0,028	0,028	0,089	0,144	0,389	11,144	65,627	14,423	3,354	1,65	1,334	1,253	100,000

Tabla 11. Tabla de incidencia Período Tp v/s Dirección media de oleaje DirM.

3.4 RÉGIMEN DE TEMPORALES

Se refiere al estudio de la distribución de los sucesos cuya H_{m0} supera un determinado valor umbral que en este trabajo se ha fijado en $H_{m0,u} = 4m$.

Para la obtención de los temporales, se utiliza el método de picos sobre un umbral (POT, Peaks Over Threshold) sobre toda la serie de datos de estado de mar del nodo de Valparaíso. La Figura 27 ilustra esquemáticamente como se realiza la selección de temporales:

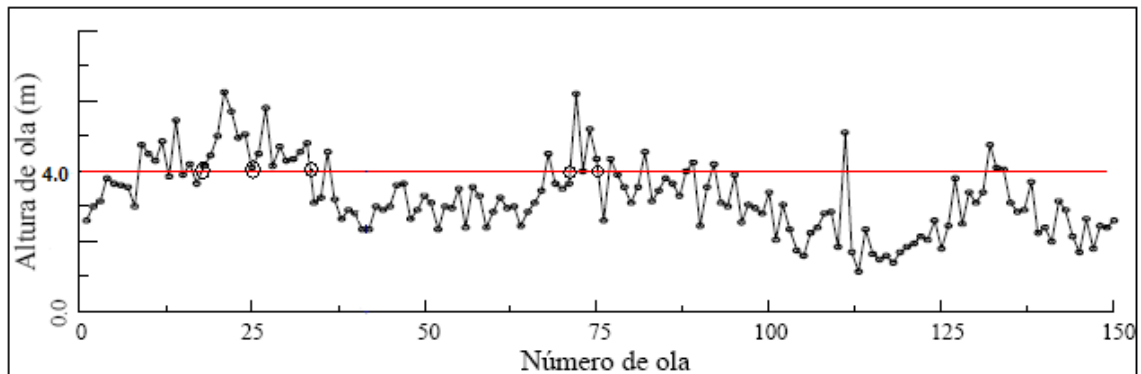


Figura 27. Método POT. Fuente: Ref.12.

El temporal queda caracterizado por el valor máximo de altura de ola alcanzado, su correspondiente período de pico, dirección media de procedencia, y su duración en horas.

De esta manera se han seleccionado 83 temporales, siendo el número medio de temporales por año de 20.75.

Los histogramas de altura de ola (Figura 28), período de pico (Figura 29) y dirección de procedencia (Figura 30) muestran que los temporales seleccionados contienen alturas máximas entre los 4 y 6[m] con períodos entre los 7 y 17[s] y dirección de procedencia desde SSW al N.

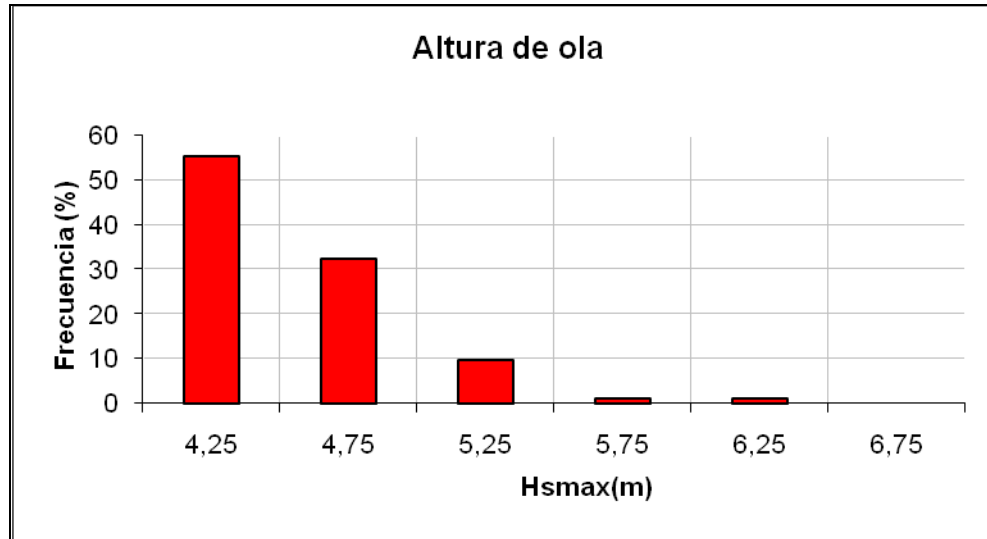


Figura 28. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de Hsmax de cada temporal.

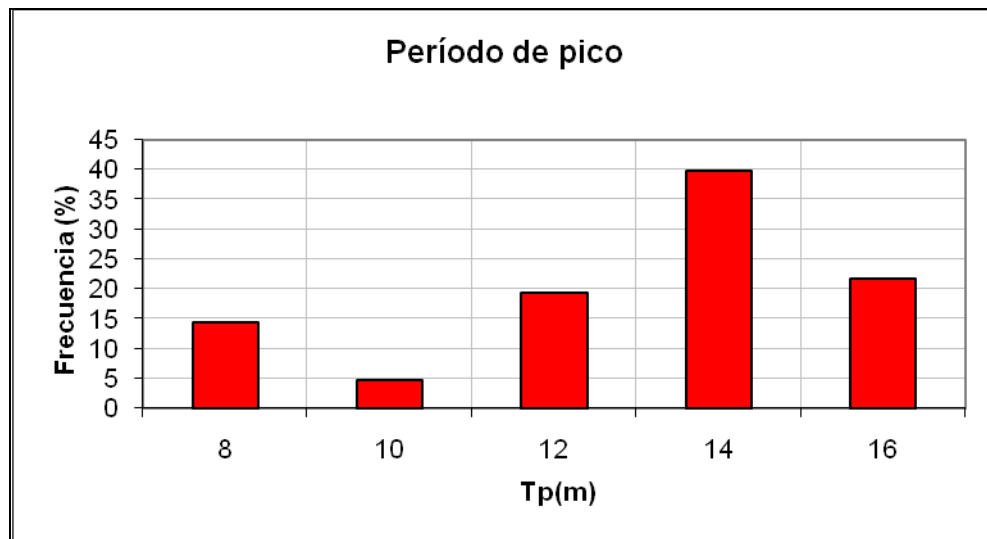


Figura 29. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de Tp de cada temporal.

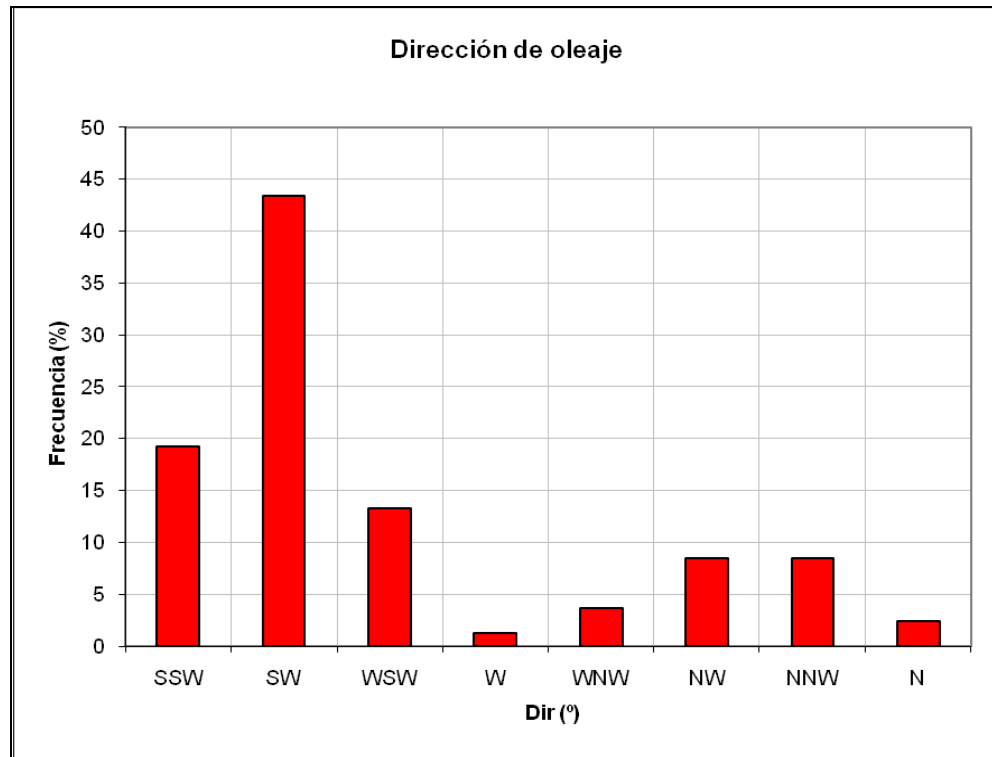


Figura 30. Histograma correspondiente a la presentación en frecuencia de Dir de cada temporal.

La Tabla 12 muestra las frecuencias de presentación conjunta de la altura de ola pico del temporal y su período correspondiente. Se puede observar que un porcentaje del 98% corresponde a olas con altura entre 4.0 y 5.5[m]. Los períodos con mayor presentación están entre los 11.0 y 17.0[s]. La Tabla 13 presenta las combinaciones conjunta de altura de ola significativa del temporal y dirección de oleaje correspondiente. Se observa que un 76% del total de temporales provienen del SSW, SW, WSW.

Altura de ola significativa máxima - Período de pico (%)						
Hsmax(m)	Período de pico (s)					TOTAL
	7.0-9.0	9.0-11.0	11.0-13.0	13.0-15.0	15.0-17.0	
4.0-4.5	7,29	1,20	15,66	20,48	9,64	54,270
4.5-5.0	4,82	2,41	3,61	15,66	7,23	33,730
5.0-5.5	2,41	0,00	0,00	2,41	4,82	9,640
5.5-6.0	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00	1,200
6.0-6.5	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	1,200
6.5-7.0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000
TOTAL	14,520	4,810	19,270	39,750	21,690	100,00

Tabla 12. Tabla de incidencia Altura de ola Hsmax v/s Periodo de pico Tp.

Altura de ola significativa máxima - Dirección media (%)									
Hsmax(m)									TOTAL
	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N	
4.0-4.5	14,46	20,48	7,23	1,20	1,20	6,02	3,61	0,00	54,20
4.5-5.0	3,61	18,07	3,61	0,00	2,41	1,20	3,61	1,20	32,51
5.0-5.5	0,00	4,82	2,41	0,00	0,00	1,20	1,20	0,00	9,63
5.5-6.0	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20
6.0-6.5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	0,00
6.5-7.0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL	19,27	43,37	13,25	1,20	3,61	8,42	8,42	2,40	100,00

Tabla 13. Tabla de incidencia Altura de ola Hsmax v/s Dirección de oleaje DirM.

Período de pico - Dirección media (%)								
Tp(s)								TOTAL
	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
7.0-9.0	1,20	1,20	0,00	0,00	0,00	3,61	7,23	13,24
9.0-11.0	1,20	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	3,60
11.0-13.0	3,61	6,02	3,61	1,20	1,20	3,61	0,00	19,25
13.0-15.0	12,05	19,28	6,02	0,00	1,20	1,20	0,00	39,75
15.0-17.0	1,20	15,66	3,61	0,00	1,20	0,00	0,00	21,67
TOTAL	19,26	43,36	13,24	1,20	3,60	8,42	8,43	100,00

Tabla 14. Tabla de incidencia Periodo de oleaje Tp v/s Dirección de oleaje DirM.

3.5 PROPAGACIÓN DEL OLAJE

3.5.1 INTRODUCCIÓN

El oleaje tras su generación, se propaga hacia la costa modificando sus características al sufrir los procesos de refracción, difracción, reflexión, asomeramiento, disipación y rotura.

Para la caracterización y predicción del oleaje en la zona de estudio es necesario la aplicación de modelos numéricos de propagación, para los que se precisa conocer los datos de oleaje en determinadas posiciones, campos de viento, corriente y batimetría.

Se propaga el oleaje desde profundidades indefinidas hasta el sitio de estudio con el modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore), (Booij et al. ,1999).

La Figura 31 muestra el dominio de propagación del modelo SWAN.

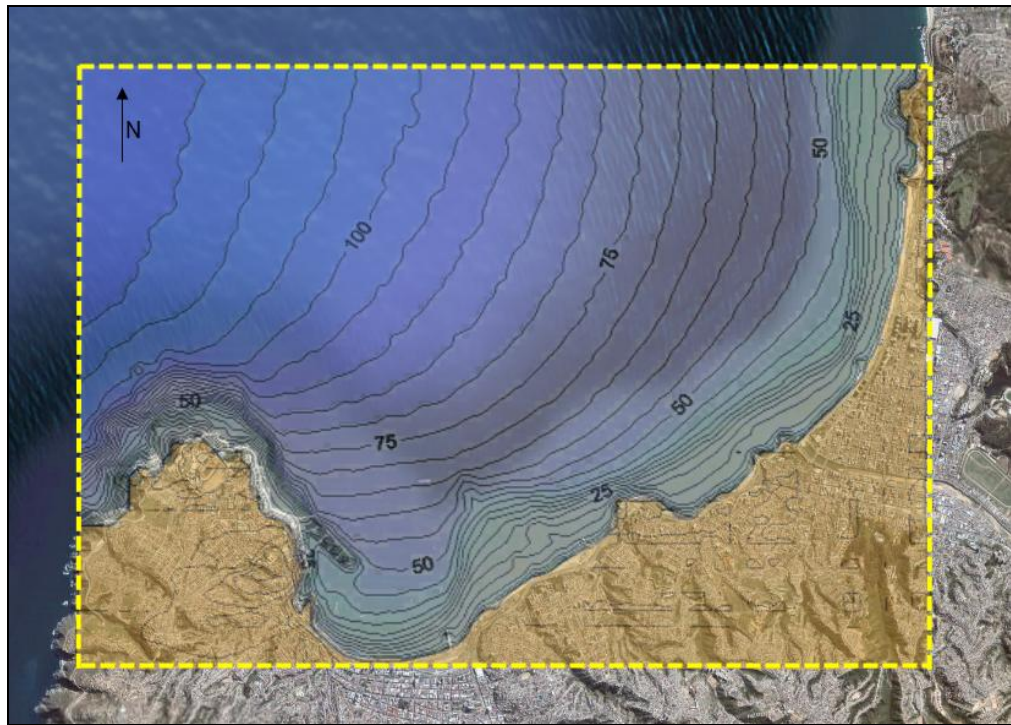


Figura 31. Dominio de propagación para modelo SWAN

3.5.2 DESCRIPCIÓN DE LA BATIMETRÍA

La batimetría empleada para ambos modelos de propagación se reproduce de la carta náutica del SHOA “Bahía y Puerto de Valparaíso” N° 5111 (Figura 32).

Se observa que la batimetría de Valparaíso no presenta grandes cambios de profundidad, es decir, posee una pendiente suave entrando a la Bahía. Pero se pueden observar grandes pendientes en la zona de Punta Ángeles, donde la batimetría sí podría resultar importante en la propagación, considerando además que el oleaje reinante procede de ese sector.

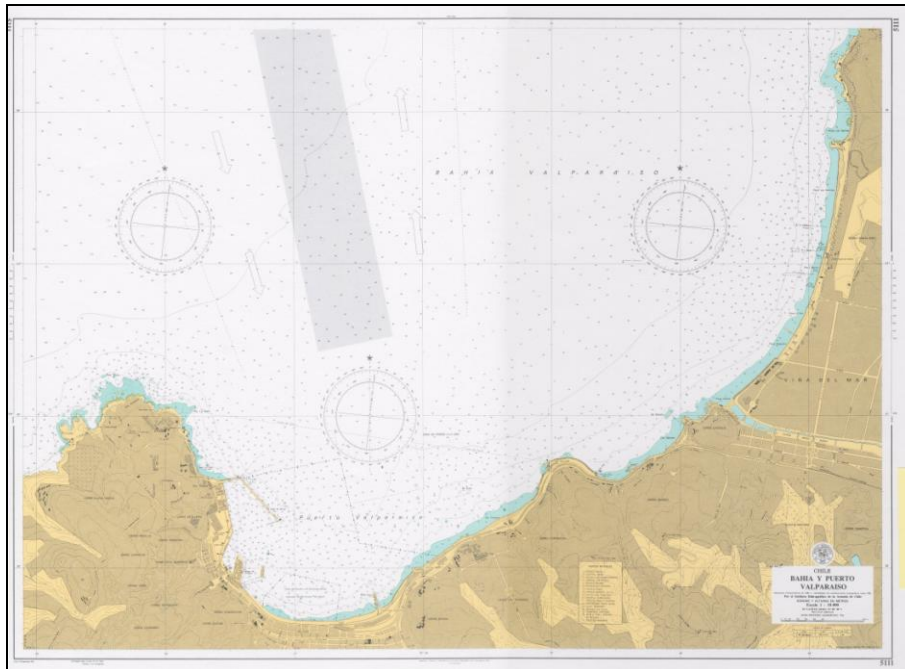


Figura 32. Batimetría de Valparaíso N° 5111

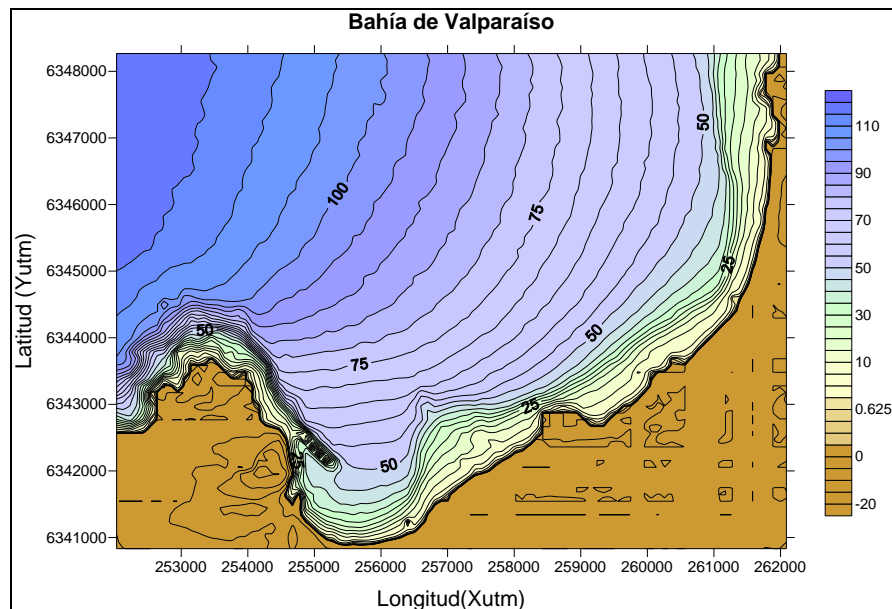


Figura 33. Batimetría de Valparaíso digitaliza por Surfer.

3.5.3 MODELO NUMERICO SWAN

El modelo numérico SWAN (Simulating Waves Nearshore, *Booij et al. 1999*) es un modelo espectral de tercera generación que resuelve la ecuación de Balance de Energía. Los modelos de tercera generación no imponen una forma definida del espectro, y la ecuación de transporte de energía se calcula completamente, como también los términos no lineales (Ref.18)

El SWAN trabaja a través de esquemas implícitos, incondicionalmente estables, y en su ecuación considera términos sumideros como términos de tasa de cambio de la densidad de acción de ola, propagación en el espacio de la densidad de acción de la ola, efectos de refracción, y términos fuentes como el crecimiento y decaimiento de la energía de la ola suministrada por el viento, interacciones y transferencia no lineales de energía, decaimiento por rotura de las crestas de ola, fricción con el fondo y rotura de la ola inducida por la profundidad.

3.5.4 CONFIGURACIÓN DE LA MALLA DE PROPAGACIÓN

Para hacer efectiva la propagación, SWAN necesita la definición de mallas o redes computacionales espaciales, elementos rectangulares caracterizados por la presencia de nodos, donde el modelo numérico calcula los parámetros de oleaje. En este caso, la configuración de la malla dependerá de la batimetría disponible en el sector de estudio.

El modelo SWAN no tiene restricción en la disposición espacial de la malla, de manera que no ha sido necesario rotar la misma. Se entenderá en adelante esta malla como *Malla Gruesa*, y se caracteriza por tener discretizaciones en su dominio mayores que las mallas más cercanas a la costa.

El modelo necesita la descripción de la malla gruesa, como su ubicación geográfica, longitud en cada eje y su discretización espacial; descripción de la batimetría; campos de entrada como campos de corriente, nivel de marea, campos de viento; fenómenos físicos que se tendrán en cuenta como fricción, set-up, o whitcapping; tipo de espectro y condiciones de contorno inicial como altura de ola, período característico, y dirección de oleaje.

Dicho lo anterior, los nodos que conforman la malla gruesa tendrá como condición inicial, los estados de mar que se detallan en Tabla 16.

3.5.5 DISPOSICIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LA MALLA DE PROPAGACIÓN

A continuación se detalla una serie de consideraciones que se han tenido en cuenta en el momento de la configuración de la malla:

- La malla se orienta de forma alineada a los ejes coordenados y no necesariamente a las líneas batimétricas.
- La malla se dispone siempre cubriendo ampliamente la zona de estudio de tal manera de no sufrir problemas de reflexión lateral en los contornos.
- En una primera instancia, no existen límites en el número de nodos con que se esté trabajando, pero se debe tener en cuenta que a mayor número de nodos, mayor es el costo computacional.

3.5.6 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS

La *Malla Gruesa* posee una extensión de aproximadamente 7.5[km] offshore y 10[km] a lo largo de la costa. La grilla consiste en 50 nodos en el eje X con un espaciamiento de 201.16[m] y 37 nodos en el eje Y con un espaciamiento de 200.93[m].

La Tabla 15 resume las características de la malla computacional para el modelo SWAN:

	Min. (m)	Max. (m)	Largo (m)	Δ (m)	celdas
X	252030.112	262088	10057.888	201.16	50
Y	6340832.91	6348267.5	7434.59	200.93	37

Tabla 15. Característica de la malla computacional para modelo SWAN

3.5.7 CASOS A PROPAGAR

Los casos a propagar son los siguientes:

CASO	DIRECCION	ALTURA SIGNIFICANTE (m)	PERIODO DE PICO (s)
00,01,02,03,04,05	N	4	7,9,11,13,15,17
06,07,08,09,10,11	N	5	7,9,11,13,15,17
12,13,14,15,16,17	N	6	7,9,11,13,15,17
18,19,20,21,22,23	N	7	7,9,11,13,15,17
24,25,26,27,28,29	N	8	7,9,11,13,15,17
30,31,32,33,34,35	NNW	4	7,9,11,13,15,17
36,37,38,39,40,41	NNW	5	7,9,11,13,15,17
42,43,44,45,46,47	NNW	6	7,9,11,13,15,17
48,49,50,51,52,53	NNW	7	7,9,11,13,15,17
54,55,56,57,58,59	NNW	8	7,9,11,13,15,17
60,61,62,63,64,65	NW	4	7,9,11,13,15,17
66,67,68,69,70,71	NW	5	7,9,11,13,15,17
72,73,74,75,76,77	NW	6	7,9,11,13,15,17
78,79,80,81,82,83	NW	7	7,9,11,13,15,17
84,85,86,87,88,89	NW	8	7,9,11,13,15,17
90,91,92,93,94,95	WNW	4	7,9,11,13,15,17
96,97,98,99,100,101	WNW	5	7,9,11,13,15,17
102,103,104,105,106,107	WNW	6	7,9,11,13,15,17
108,109,110,111,112,113	WNW	7	7,9,11,13,15,17
114,115,116,117,118,119	WNW	8	7,9,11,13,15,17
120,121,122,123,124,125	W	4	7,9,11,13,15,17
126,127,128,129,130,131	W	5	7,9,11,13,15,17
132,133,134,135,136,137	W	6	7,9,11,13,15,17
138,139,140,141,142,143	W	7	7,9,11,13,15,17
144,145,146,147,148,149	W	8	7,9,11,13,15,17
150,151,152,153,154,155	WSW	4	7,9,11,13,15,17
156,157,158,159,160,161	WSW	5	7,9,11,13,15,17
162,163,164,165,166,167	WSW	6	7,9,11,13,15,17
168,169,170,171,172,173	WSW	7	7,9,11,13,15,17
174,175,176,177,178,179	WSW	8	7,9,11,13,15,17
180,181,182,183,184,185	SW	4	7,9,11,13,15,17
186,187,188,189,190,191	SW	5	7,9,11,13,15,17
192,193,194,195,196,197	SW	6	7,9,11,13,15,17
198,199,200,201,202,203	SW	7	7,9,11,13,15,17
204,205,206,207,208,209	SW	8	7,9,11,13,15,17
210,211,212,213,214,215	SSW	4	7,9,11,13,15,17
216,217,218,219,220,221	SSW	5	7,9,11,13,15,17
222,223,224,225,226,227	SSW	6	7,9,11,13,15,17
228,229,230,231,232,233	SSW	7	7,9,11,13,15,17
234,235,236,237,238,239	SSW	8	7,9,11,13,15,17

Tabla 16. Casos de propagación.

3.5.8 PUNTOS DE CONTROL

Para obtener los resultados de la propagación, se disponen de puntos de control en la zona de estudio. La Figura 34 muestra la ubicación de estos puntos:



Figura 34. Detalle de los puntos de control en la zona de estudio.

Puntos de Control		
	Longitud (m)	Latitud (m)
1	257511.97	6342184.59
2	257630.83	6342311.77
3	257807.92	6342393.22
4	257991.88	6342512.94
5	258195.99	6342608.52

Tabla 17. Coordenadas de los puntos de control en la zona de estudio.

3.5.9 SALIDA DE LAS PROPAGACIONES

De las propagaciones de oleaje en el área oceánica desde SSW al N, se han obtenido los parámetros de altura de ola, período de pico y dirección de oleaje.

Se deduce que efectivamente el oleaje que proviene de Punta Ángeles en aguas profundas es el que sufre mayor transformación en su propagación, y por lo tanto una mayor atenuación de la altura de ola. Esto se debe a los efectos de difracción y refracción principalmente. Por el contrario los oleajes provenientes del N, NNW y NW no sufren mayor atenuación en su dirección de propagación, pero sí se encuentran condicionados a la batimetría del sector.

La Figura 35 muestra los porcentajes de presentación de la dirección de oleaje en la zona de estudio:

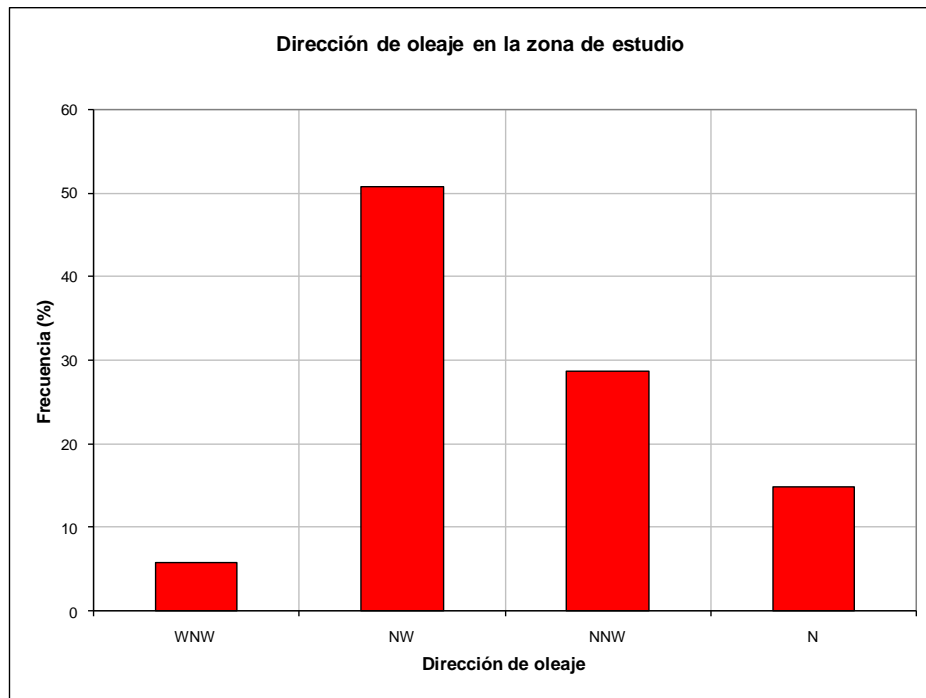


Figura 35. Histograma de dirección de oleaje que llega a la zona de estudio.

A continuación se muestran las salidas gráficas para los siguientes casos: Caso I, N, NW y NNW; caso II, WNW, W, y caso III WSW, SW, SSW:

3.5.9.1 CASO I (N, NW, NNW)

Para el caso I se observa que el conjunto de oleajes que provienen de este sector llegan a la costa con alturas de ola de hasta los 7.25[m], (cuando se ha propagado con una altura máxima de 8m), pero en mayor medida lo hacen con altura de ola de 5.25[m] (Figura 36).

Se representa el caso I con oleajes provenientes de la dirección NNW. A continuación se presentan salidas gráficas de dirección y coeficiente de propagación para un oleaje de 4 y 6[m].

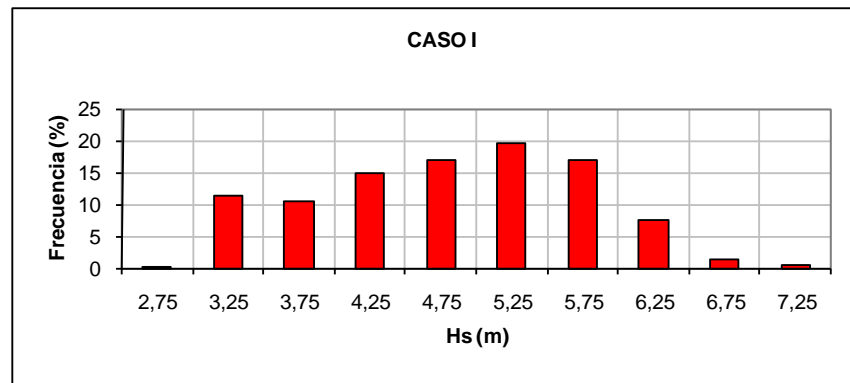


Figura 36. Histograma de alturas de ola en la zona de estudio correspondiente a direcciones N, NW y NNW.

La Figura 37 muestra el patrón de propagación del oleaje NNW, y efectivamente la dirección de oleaje se va modificando débilmente. Sólo alcanza una variación del 10%. El cambio en su alineación se debe preferentemente por los efectos de refracción debido a la batimetría.

La Figura 38 y la Figura 39 muestran los coeficientes de propagación en cada punto de control para los distintos períodos de oleaje. Se observa que a medida que los períodos aumentan, también lo hacen los coeficientes de propagación, y a medida que las alturas de ola en aguas profundas son mayores, existe una atenuación mayor en los coeficientes de propagación. En cualquier caso, se observa una leve disminución de la altura de ola, que no varía más del 30%.

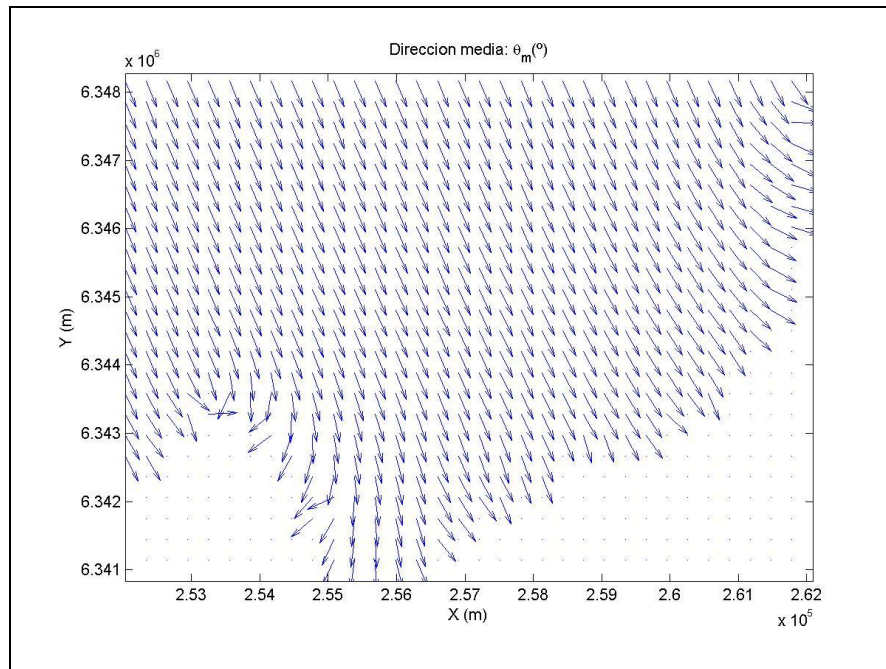


Figura 37. Propagación dirección de oleaje, NNW

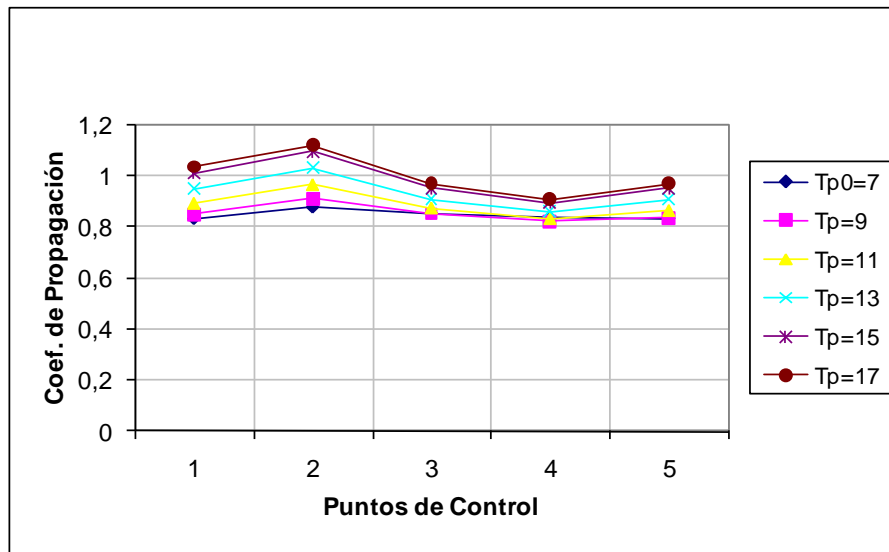


Figura 38. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=4, Dir=NNW

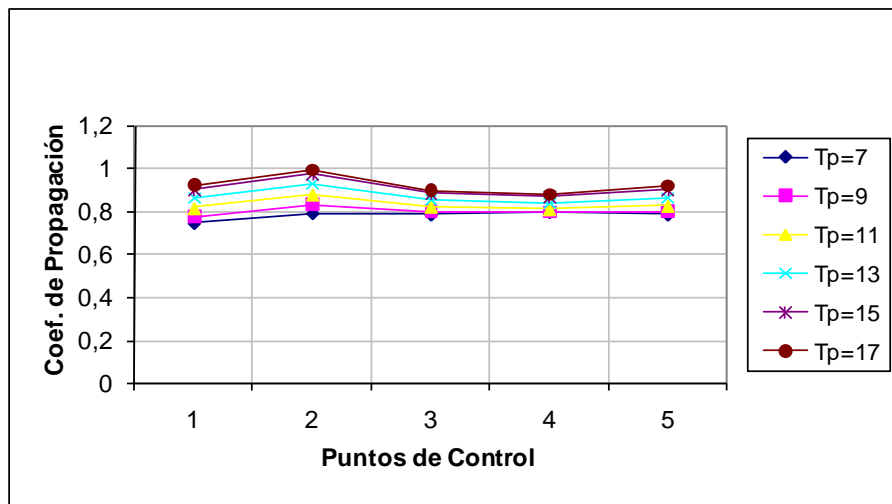


Figura 39. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=6, Dir=NNW

3.5.9.2 CASO II (WNW, W)

Para el caso II se observa que el conjunto de oleajes que provienen de este sector llegan a la costa con alturas de ola de hasta los 5.25[m], aunque en mayor medida llegan alturas de ola de 2.75[m] (Figura 40).

Al igual que el caso anterior, para representar el caso II, se presentan salidas gráficas del oleaje proveniente de la dirección WNW, y sus correspondientes coeficientes de propagación para oleajes de 4 y 6[m].

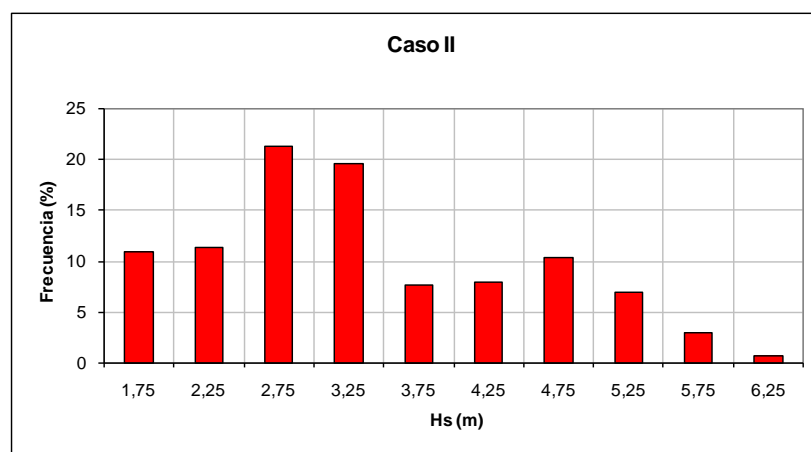


Figura 40. Histograma de altura de ola en la zona de estudio correspondiente a direcciones WNW y W

La Figura 41 muestra el patrón de propagación del oleaje WNW, y para este caso la dirección de oleaje en su propagación se modifica hasta un 16% aproximadamente.

La Figura 42 y la Figura 43 muestran los coeficientes de propagación en cada punto de control para los distintos períodos de oleaje. Se observa que la variación de los coeficientes tienen el mismo patrón que el caso anterior, es decir, existe un aumento en los coeficientes de propagación cuando los períodos son más largos. Por otro lado se observa que para estas direcciones, la altura de ola disminuye en su propagación en mayor porcentaje que las direcciones N, NNW, NW, prácticamente un 45%, y esto se debe por la presencia de Punta Ángeles que condiciona el patrón de propagación para estas direcciones.

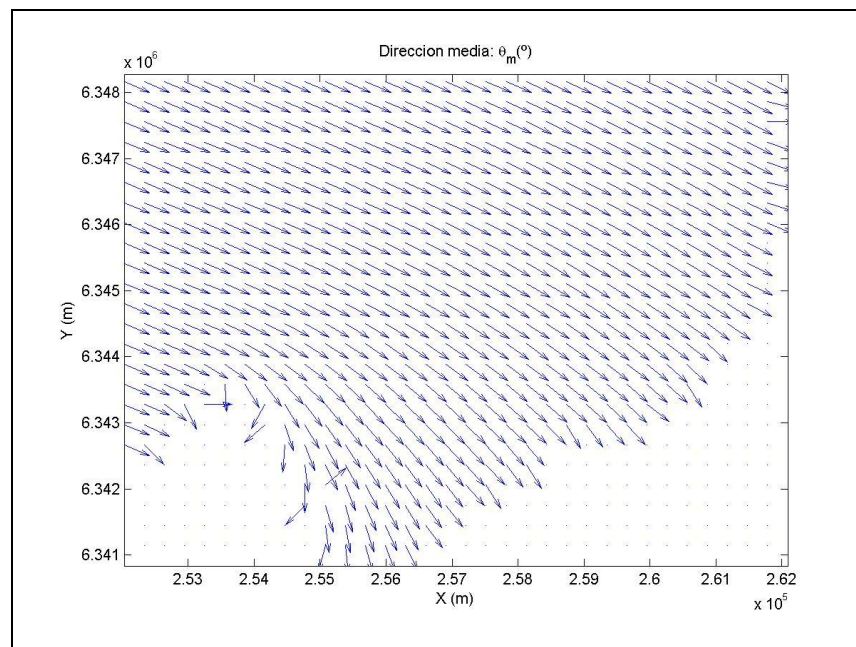


Figura 41. Propagación dirección de oleaje, WNW

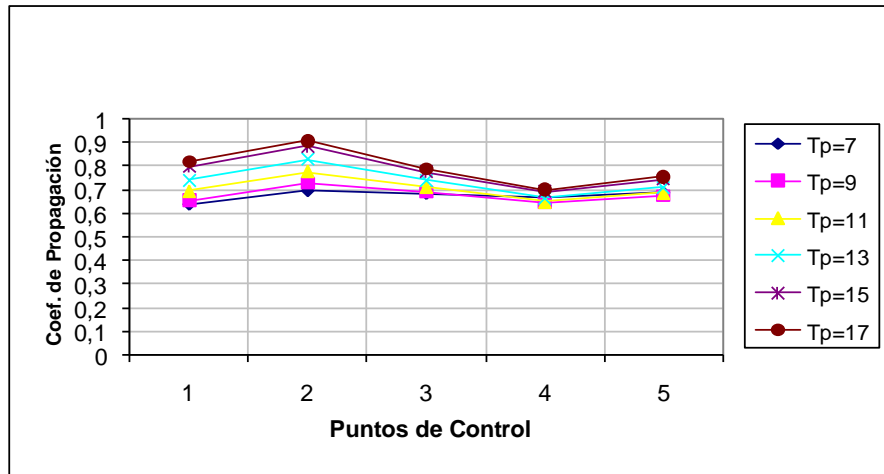


Figura 42. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=4, Dir=WNW

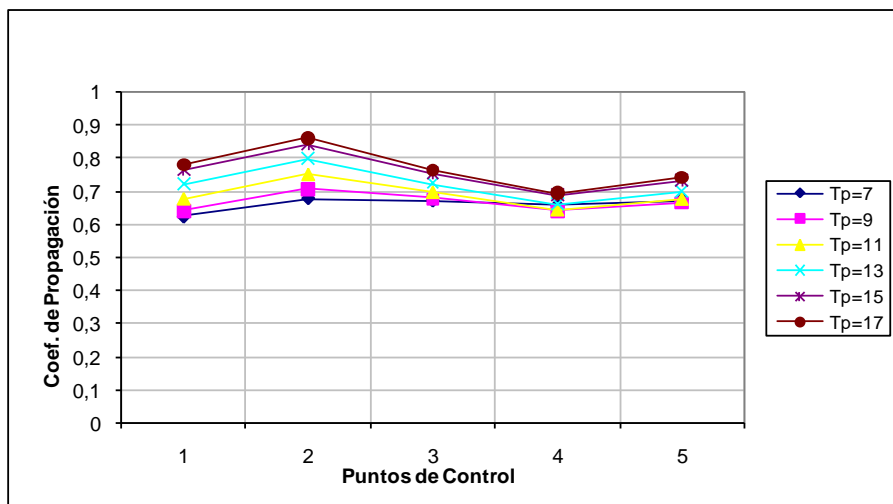


Figura 43. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=6, Dir=WNW

3.5.9.3 CASO III (WSW, SW, SSW)

Para el caso III se observa que el conjunto de oleaje que proviene de este sector llega a la costa con alturas de ola de hasta los 3.25[m], pero en mayor medida lo hacen con alturas de ola de 0.75[m] (Figura 44).

Se representa el caso III con oleajes provenientes del SW. Al igual que los casos anteriores, se presentan salidas gráficas de dirección y coeficiente de propagación para un oleaje de 4 y 6[m].

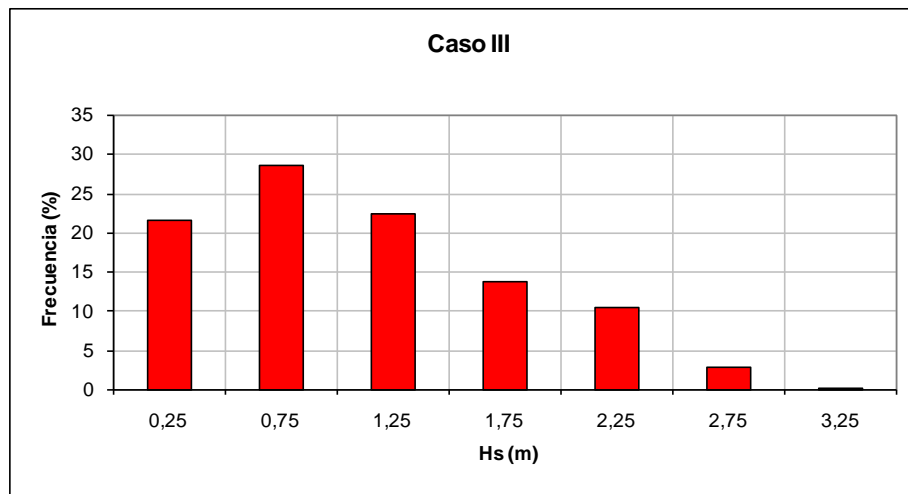


Figura 44. Histograma de altura de ola en la zona de estudio correspondiente a direcciones WSW y SW y SSW.

La Figura 45 muestra el patrón de propagación del oleaje SW y para este caso, la dirección de oleaje en su propagación se modifica hasta un 46% aproximadamente.

La Figura 46 y la Figura 47 muestran los coeficientes de propagación, y se observa que los coeficientes son muy inferiores a los casos anteriores, y por lo tanto se deduce que la altura de ola disminuye considerablemente en más de un 80%. Al igual que el caso anterior, el patrón de propagación que presentan estas direcciones está fuertemente condicionado a la presencia de Punta Ángel.

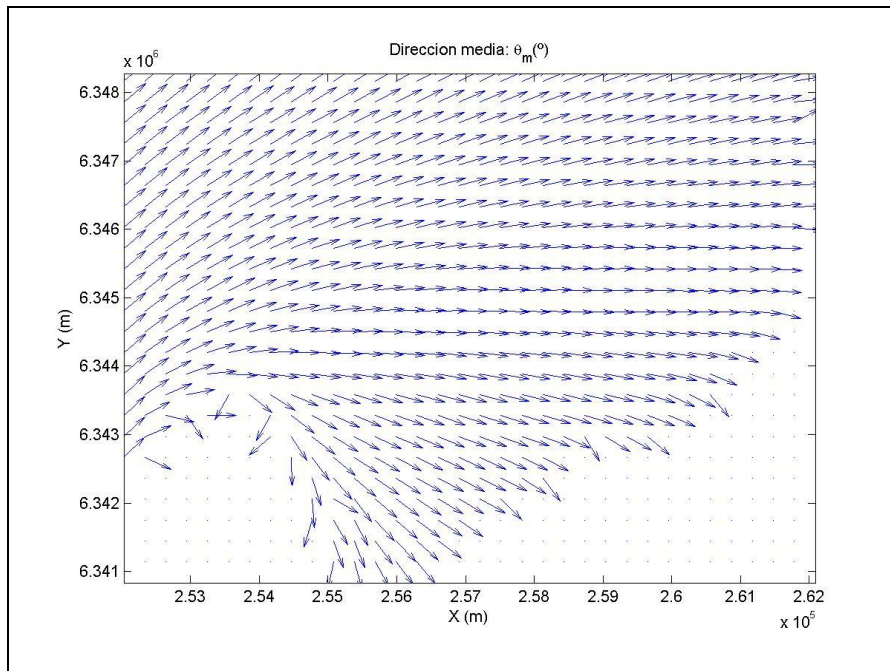


Figura 45. Propagación dirección de oleaje, SW

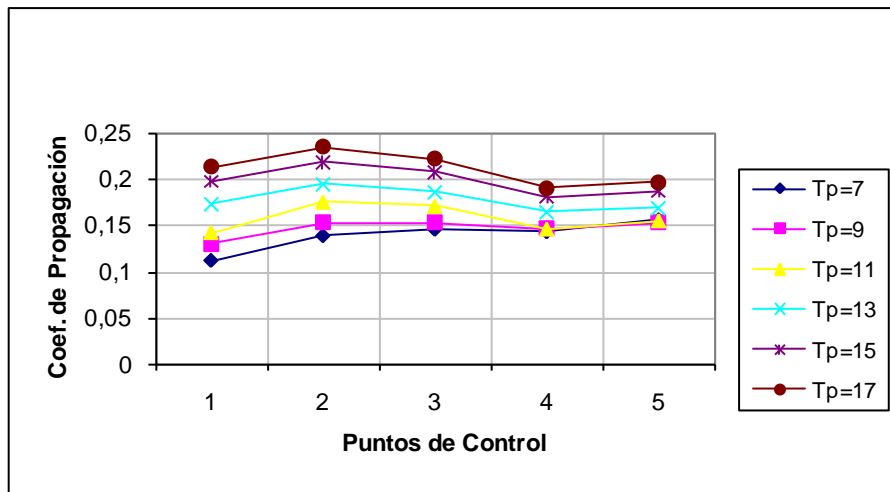


Figura 46. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=4, Dir=SW

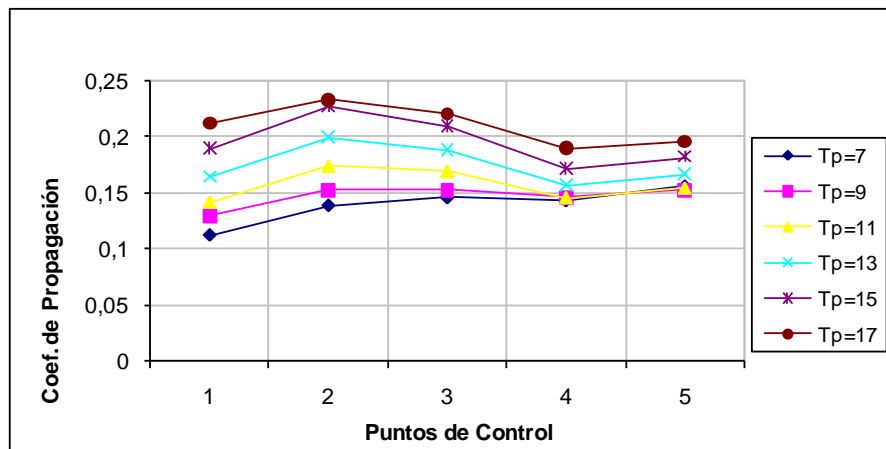


Figura 47. Gráfico de coef. de propagación Hsmax=6, Dir=SW

De la propagación se puede concluir que los cambios de dirección en la propagación depende en gran medida de la dirección de procedencia en áreas oceánica del oleaje. Así, los oleajes provenientes del WNW, W, WSW, SW y SSW son los que presentan un mayor grado de cambio en la dirección de propagación, y se debe especialmente por la presencia de Punta Ángeles. Se deduce además que las alturas de ola se van atenuando a medida que se acercan a la costa, y por supuesto los oleajes con menores alturas son los que proceden de las direcciones anteriores (se reducen en más de un 81%). Por otro lado, los oleajes llegan a la costa con dirección WNW, NW, NNW y N, con mayor porcentaje de presentación la dirección NW.

ANEXO 4. ECUACIÓN DE MORISON ET AL. (1950)

4.1 INTRODUCCIÓN

Para el diseño de obras marítimas cuyo agente predominante es el oleaje es preciso calcular las fuerzas que las oscilaciones ejercen sobre la estructura debido a su mutua interferencia. En el caso de obras fijas emergidas, el régimen de acciones depende de las dimensiones de la obra en relación con la longitud de onda de la oscilación, L .

Para una obra de pequeño volumen, esto es, con dimensiones en planta en las direcciones longitudinal y transversal del mismo orden de magnitud D , cuyo valor sea pequeño en relación con la longitud de onda, L , ($D/L < 0.05$) la acción del oleaje sobre la estructura proviene de:

- la formación de vórtices y estelas que crean gradientes de presión a un lado y a otro de la estructura y que se concretan en fuerzas de arrastre y sustentación
- la variación temporal del movimiento oscilatorio que se manifiesta en fuerzas de inercia.

En analogía con lo que ocurre para flujos unidireccionales alrededor de obstáculos, Morison et al (1950) proponen una fórmula empírica para el cálculo de fuerzas de arrastre e inercia, válida para valores de $D/L < 0.05$. (Ref.15 y Ref.16).

A continuación, con el fin de ilustrar el comportamiento del fluido alrededor del pilote y las fuerzas que ejerce sobre el mismo, se presenta el cálculo realizado con teoría potencial para flujo unidireccional estacionario despreciando la fricción, para después analizar cómo se modifica la ley de presiones cuando existe fricción para diferentes valores del Número de Reynolds y a continuación estudiar la contribución de la parte no estacionaria.

Finalmente se presenta la formulación de Morison et al (1950) para el cálculo de la distribución vertical de la fuerza ejercida por un tren monocromático sobre el pilote.

4.2 APROXIMACIÓN DE FLUJO POTENCIAL

Se considera un fluido incompresible no viscoso y un flujo unidireccional irrotacional de tal manera que el campo de velocidades y de presiones puede describirse mediante la función potencial ϕ .

En un sistema de coordenadas polares centrado en el eje del cilindro, la ecuación de gobierno es la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

Que debe satisfacer la condición de contorno de flujo nulo a través de la superficie del cilindro

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad \text{en } r = 0$$

Por otra parte, lejos del obstáculo, la solución debe reproducir el campo de velocidades no perturbado por la presencia del mismo, $U(t)$.

El problema debe ser resuelto por separación de variables, obteniéndose la siguiente expresión para la función potencial:

$$\phi(r, \theta) = U(t) r \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$$

Para el cálculo de la distribución de presiones alrededor del cilindro se utiliza la ecuación de Bernoulli en la pared del cilindro y en un punto lejano del mismo:

$$\left[\frac{p(r, \theta)}{\rho} + gz + \frac{u_r^2 + u_\theta^2}{2} - \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{r=a} = \left[\frac{p(r, \theta)}{\rho} + gz + \frac{u_r^2 + u_\theta^2}{2} - \frac{\partial \phi}{\partial t} \right]_{\substack{r=l \\ \theta=0}}$$

De donde se obtiene la siguiente expresión:

$$p(a, \theta) - p(l, 0) = \rho \left[\frac{U^2(t)}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta) + 2a \frac{dU}{dt} \cos \theta - l \frac{dU}{dt} \right]$$

Esta expresión indica que la presión es la contribución de dos términos, un término proporcional a la velocidad al cuadrado referido a un flujo estacionario, y un término inercial que está asociado a la aceleración del flujo.

4.2.1 CONTRIBUCIÓN FLUJO ESTACIONARIO

El término estacionario que contribuye a la presión es:

$$p(a, \theta) - p(l, 0) = \frac{\rho U^2(t)}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta)$$

Esta presión es simétrica sobre el cilindro, y si no hay presencia de vórtices y estelas, la presión es la misma en parte trasera y delantera. Integrando la presión alrededor del cilindro, la fuerza de arrastre por unidad de longitud:

$$dF_D = \int_0^{2\pi} p(a, \theta) a \cos \theta d\theta$$

$$dF_D = \int_0^{2\pi} \left[\frac{\rho U^2(t)}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta) + p(l, 0) \right] a \cos \theta d\theta$$

$$dF_D = 0$$

Esto significa que, cuando la presión es simétrica, no hay una fuerza sobre el cilindro, cuando el fluido es ideal y estacionario.

En realidad la fricción produce separación del flujo detrás del obstáculo modificando la ley de presiones. La diferencia de presiones a un lado y a otro de la estructura hace que la resultante neta no sea nula. Esta fuerza llamada de arrastre depende del valor del Número de Reynolds que rige el comportamiento del flujo alrededor del obstáculo.

La expresión de la presión obtenida según la teoría potencial es válida en la zona en la que no se ha producido la separación del flujo, esto es, para $|\theta| < \theta_s$, siendo θ_s el ángulo del punto en el que se produce la separación, por lo que la fuerza de arrastre podría estimarse como:

$$dF_D = 2 \int_0^{\theta_s} \frac{\rho U^2(t)}{2} (1 - 4 \sin^2 \theta) a \cos \theta d\theta + 2 \int_{\theta_s}^{\pi} p_{es} a \cos \theta d\theta$$

$$dF_D = \rho U^2(t) a \left[\int_0^{\theta_s} (1 - 4 \sin^2 \theta) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_s}^{\pi} \frac{p_{es}}{\rho U^2(t) / 2} \cos \theta d\theta \right]$$

Tanto el término θ_s y p_{es} varían con el número de Reynolds, por lo tanto también varía todo el término que se encuentra dentro de los corchetes. Este término se puede expresar como un coeficiente, C_D , llamado coeficiente de arrastre y que varía con el número de Reynolds.

Luego, la fuerza de arrastre se puede escribir como:

$$dF_D = C_D \rho D \frac{U^2(t)}{2}$$

Donde $D = 2a$ es el diámetro del cilindro.

4.2.2 CONTRIBUCIÓN FLUJO NO ESTACIONARIO

La contribución no estacionaria a la expresión de la presión en el flujo potencial es:

$$\rho \left(2a \frac{dU}{dt} \cos \theta - l \frac{dU}{dt} \right)$$

Y la fuerza resultante la que se obtiene integrando sobre las paredes del cilindro:

$$\int_0^{2\pi} \rho 2a \frac{dU}{dt} a \cos^2 \theta d\theta - \int_0^{2\pi} \rho l \frac{dU}{dt} a \cos \theta d\theta$$

El segundo término de la derecha no contribuye a la fuerza. Luego:

$$dF_I = \rho a^2 \frac{dU}{dt} 2\pi$$

πa^2 es el volumen del cilindro por unidad de longitud.

En general, la fuerza inercial suele expresarse como:

$$dF_I = C_M \rho V \frac{dU}{dt}$$

Donde C_M es el coeficiente de inercia que depende de la forma del obstáculo y del número de Reynolds. Esta fuerza llamada fuerza inercial se debe a que las masas de fluido que se aceleran alrededor del cilindro provocan fuerzas añadidas a las de arrastre.

4.3 ECUACIÓN DE MORISON

Para el cálculo de la fuerza que ejerce el fluido sobre un pilote se utiliza la ecuación de Morison (Morison et al. 1950) que propone, en analogía a las expresiones vistas anteriormente, una fuerza como la suma de los términos de fuerza de arrastre y fuerza de inercia.

Esta fórmula semi-empírica fue realizada para el cálculo de las fuerzas de una oscilación monocromática sobre un elemento delgado inmerso en el agua, con efectos de difracción basados en el hecho de que la sección transversal del elemento es mucho más pequeña que la longitud de ola incidente, es decir, $D/L < 0.05$, donde D representa el diámetro del pilote y L la longitud de la onda.

La ecuación de Morison et. al (1950) está dada por:

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho D u |u| + C_M \rho V \frac{du}{dt}$$

donde:

- C_M : Coeficiente de Inercia.
- C_D : Coeficiente de Arrastre.
- ρ : Densidad del Agua.
- D : Diámetro del elemento.
- u : Velocidad del fluido normal al elemento.
- V : Volumen del cilindro.

Las ecuaciones para la velocidad, aceleración y elevación de la superficie son:

$$u = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{g\pi H}{L} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$$

4.3.1 FUERZA TOTAL

Para determinar la fuerza total sobre un pilote por unidad de elevación, se integra la ley de presiones en toda la columna de agua:

$$F = \frac{\rho C_D D}{2} \int_{-d}^0 \left(\frac{H}{2} \right)^2 \sigma^2 \frac{\cosh^2 k(d+z)}{\sinh^2 kd} \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)| dz$$

$$+ \frac{\rho C_M \pi D^2}{4} \int_{-d}^0 \frac{H}{2} \sigma^2 \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \sigma t) dz$$

Obteniéndose:

$$F = C_D D n E \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)| + C_M \pi D E \frac{D}{H} \tanh kd \sin(kx - \sigma t)$$

De manera análoga, se obtiene el momento de la fuerza con respecto al suelo:

$$M = C_D D n E \cos(kx - \sigma t) |\cos(kx - \sigma t)| \left\{ h \left[1 - \frac{1}{2n} \left(\frac{\cosh 2kd - 1 + 2(kd)^2}{2kd \sinh 2kd} \right) \right] \right\}$$

ANEXO 5. DESCRIPCIÓN

MODELO DE

PROPAGACIÓN SWAN

5.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se detalla el modelo de propagación utilizado en este trabajo.

5.2 MODELO SWAN

El modelo SWAN, (Booij et al., 1999), es un modelo espectral que reproduce la energía contenida en las ondas en su propagación desde superficies oceánicas hasta las zonas costeras, teniendo en cuenta cambios de altura, forma y dirección de la ola como resultado de la acción del viento, rotura de ola, transferencia de energía entre componentes y variaciones de la profundidad del fondo así como la aparición de corrientes.

Dicho modelo está basado en los llamados third generation models, (WANDI-Group, 1998), (Komen et al., 1994), WAVEWATCH II (Tolman, 1991), TOMAWAC (Benoit et al., 1996) para la propagación de las ondas en aguas profundas los cuales están basados, a su vez en la ecuación de Balance de Energía, para la densidad de acción. Estos modelos no pueden ser aplicados a zonas costeras con unas escalas de longitud menores de 20-30 km y profundidades menores de 20-30 m debido a que:

- No tienen en cuenta efectos de profundidades reducidas como rotura e interacción onda-onda.
- Las técnicas numéricas empleadas son muy costosas computacionalmente en escalas pequeñas y zonas de profundidad reducida.

Por ello, el modelo SWAN es desarrollado con el objetivo de mejorar a dichos modelos mediante:

- Uso de esquemas implícitos, incondicionalmente estables.
- Modelado de rotura inducida por la profundidad e interacción onda-onda.

5.2.1 ECUACIÓN DE GOBIERNO

Toda la información acerca de la superficie libre del mar está contenida en la densidad de energía espectral $E(\sigma, \theta)$, distribuida sobre todas las frecuencias σ y direcciones de propagación θ . Normalmente, los modelos determinan la evolución de la densidad de acción definida como $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$ en el espacio y en el tiempo. La razón por la cual se utiliza dicha magnitud es porque es conservada durante la propagación del oleaje en presencia de corrientes marinas, mientras que la densidad $E(\sigma, \theta)$ no lo es, (Whitham, 1974). En general es asumido que la corriente es uniforme con respecto a la coordenada vertical y se denota como \vec{U} .

Hay que tener en cuenta que en presencia de corrientes la frecuencia angular absoluta ω y la frecuencia angular relativa σ (frecuencia en presencia de corrientes) se relacionan mediante la siguiente relación:

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U}$$

La evolución de la densidad de acción N es gobernada mediante la ecuación de balance, (Komen et al., 1994; Mei, 1983)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot \left[(\vec{c}_g + \vec{U}) N \right] + \frac{\partial c_{\sigma} N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\theta} N}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma}$$

Donde:

- $\frac{\partial N}{\partial t}$: Representa la variación local en el tiempo de la densidad de transporte.
- $\nabla_{\vec{x}} \cdot \left[(\vec{c}_g + \vec{U}) N \right]$: denota la propagación de la energía en el espacio geográfico, con velocidad $\vec{c}_g = \partial \sigma / \partial \vec{k}$ con una relación de dispersión $\sigma^2 = g |\vec{k}| \tanh(|\vec{k}| d)$ donde \vec{k} es el vector número de onda y d la profundidad del agua.

- $\frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma}$: Representa el cambio en la frecuencia debido a variaciones en la profundidad y en las corrientes.
- $\frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta}$: Representa la refracción debida a cambios en la profundidad y en las corrientes.
- $\frac{S}{\sigma}$: El término $S = S(\sigma, \theta)$ contiene las fuentes y sumideros que representan los procesos físicos de generación, disipación y regeneración de la energía.

Las cantidades c_σ y c_θ representan la propagación en el espacio espectral (σ, θ) .

La ecuación de Balance puede ser expresada tanto en coordenadas cartesianas como coordenadas esféricas. En el caso de aplicaciones a pequeña escala y coordenadas cartesianas, dicha ecuación se expresa como: (Hasselmann et al., 1973).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_x N}{\partial x} + \frac{\partial c_y N}{\partial y} + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

5.2.2 TERMINOS FUENTES Y SUMIDEROS

En aguas someras, existen 6 procesos físicos que contribuyen al término S_{tot} :

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br}$$

Dichos términos denotan, respectivamente, crecimiento de oleaje por viento, transferencia no lineal de energía mediante interacción entre 3 y 4 componentes y disipación debida a la rotura (por descrestamiento y debida al fondo).

5.2.3 MAGNITUDES FÍSICAS

A partir del modelo SWAN se pueden obtener valores de las siguientes magnitudes físicas bien en puntos aislados o bien en toda la zona de aplicación del modelo.

- Altura Significante (m):

$$H_s = 4\sqrt{\int \int E(\omega, \theta) d\omega d\theta}$$

- Periodo medio absoluto (s):

$$T_{m-10} = 2\pi \frac{\int \int \omega^{-1} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\int \int E(\sigma, \theta) d\theta d\sigma} = \frac{\int \int \omega^{-1} E(\omega, \theta) d\sigma d\omega}{\int \int E(\omega, \theta) d\omega d\sigma}$$

- Dirección media del espectro (°), (Kuik et al., 1988):

$$DIR = \arctan \left[\frac{\int \sin \theta E(\sigma, \theta) d\theta d\sigma}{\int \cos \theta E(\sigma, \theta) d\theta d\sigma} \right]$$

Dicha dirección es la dirección normal al frente de onda.

- Anchura normalizada del espectro de frecuencias (frequency spreading), (Battjes y van Vledder, 1984)

$$FSPR = \frac{\left| \int_0^{\infty} E(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega \right|}{E_{tot}}, \quad \tau = Tm02$$

Siendo $Tm02$ otra definición del periodo medio

$$Tm02 = 2\pi \left(\frac{\iint \omega^2 E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta}{\iint E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta} \right)^{-1/2} = 2\pi \left(\frac{\iint \omega^2 E(\omega, \theta) d\omega d\theta}{\iint E(\omega, \theta) d\omega d\theta} \right)^{-1/2}$$

- Dirección de pico PDIR ($^\circ$) del espectro direccional $D(\theta)$:
- Anchura del espectro direccional ($^\circ$):

$$DSPR^2 = \left(\frac{180}{\pi} \right)^2 \int_0^{2\pi} \left(2 \sin \left(\frac{\theta - \bar{\theta}}{2} \right) \right) D(\theta) d\theta$$

- Raíz cuadrada del valor cuadrático medio de la velocidad orbital cerca del fondo (m/s):

$$U_{rms} = \left(\int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2 kh} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \right)^{1/2}$$

siendo h la profundidad local, g la aceleración de la gravedad y σ la frecuencia.

- Raíz cuadrada del valor cuadrático medio de la velocidad orbital máxima (m/s):

$$U_{bot} = \sqrt{2} U_{rms}$$

Fuerza inducida por unidad de área (Gradiente del tensor de radiación) (N/m^2)

$$F_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}$$

$$F_y = -\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

Siendo S el tensor de radiación con:

$$S_{xx} = \rho g \int \left[n \cos^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right] E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \rho g \int n \sin \theta \cos \theta E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

$$S_{yy} = \rho g \int \left[n \sin^2 \theta + n - \frac{1}{2} \right] E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

Y n es el cociente entre la velocidad de grupo y la velocidad de fase.

- Transporte de energía (m^3/s) calculado mediante

$$P_x = \rho g \iint c_x E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

$$P_y = \rho g \iint c_y E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

- Fracción de rotura Q_b , según expresión de (Battjes y Janssen, 1978)
- Energía disipada por unidad de tiempo debido a la fricción con el fondo, whitecapping y rotura DISSIP (m^2/s).