



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN EL DISEÑO DE  
OBRAS MARÍTIMAS CONDICIONADAS POR LA ACCIÓN  
DEL OLEAJE, UNA APLICACIÓN A DEFENSAS  
COSTERAS.**

**NELSON ANDRÉS MOLINA VARGAS**

MAYO 2021

**EVALUACIÓN DE LA SENSIBILIDAD EN EL DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS  
CONDICIONADAS POR LA ACCIÓN DEL OLEAJE, UNA APLICACIÓN A  
DEFENSAS COSTERAS**

**Nelson Andrés Molina Vargas**

<b>COMISIÓN REVISORA</b>	<b>NOTA</b>	<b>FIRMA</b>
MAURICIO MOLINA P. Profesor guía	_____	_____
Eduardo González P. Revisor	_____	_____
Sebastián Escobar M. Revisor	_____	_____

## **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 utilizarla con fines exclusivamente académicos.*

---

**NELSON MOLINA VARGAS**  
**ALUMNO MEMORISTA**

---

**MAURICIO MOLINA PEREIRA**  
**PROFESOR GUÍA**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Una vez aprobado el documento se completa esta sección.*

# **CONTENIDOS**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS Y ALCANCES</b>	<b>18</b>
2.1	OBJETIVOS	18
2.2	ALCANCES	18
<b>3</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
3.1	OLEAJE	19
3.1.1	GENERALIDADES	19
3.1.2	ESTADÍSTICA DE OLEAJE	19
3.1.3	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE	20
3.1.4	MODELOS HINDCASTING: GENERACIÓN OCEÁNICA	21
3.1.5	MÉTODOS DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE	22
3.2	MAREAS	23
3.2.1	MAREA ASTRONÓMICA	24
3.2.2	MAREA METEOROLÓGICA	25
3.2.3	ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE MAREAS	27
3.3	PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS	29
3.4	ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE	32
3.5	DISEÑO DE ROMPEOLAS: DIQUE EN TALUD	33
3.5.1	BASES DE DISEÑO	34
3.5.2	DISEÑO DE ESTABILIDAD	35
3.5.3	DISEÑO HIDRÁULICO	38
<b>4</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>40</b>
4.1	ANÁLISIS PREVIO	40
4.2	BASES DE DISEÑO	40
4.3	ANÁLISIS BATIMÉTRICO	41
4.3.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE	41
4.3.2	ÁREA DE APLICACIÓN	41
4.4	CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE	42
4.4.1	INFORMACIÓN DISPONIBLE	42
4.4.2	CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	43
4.4.3	CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS	43

4.4.4 TRANSFERENCIA DE OLEAJE.....	44
4.5 ANÁLISIS DE MAREAS Y NIVELES DE DISEÑO .....	46
4.5.1 INFORMACIÓN DISPONIBLE.....	46
4.5.2 MAREA ASTRONÓMICA .....	47
4.5.3 MAREA METEOROLÓGICA .....	48
4.5.4 PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS .....	50
4.5.5 NIVELES DE DISEÑO.....	52
4.6 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE .....	53
4.7 APLICACIÓN CASO PRÁCTICO.....	54
4.7.1 CRITERIOS MARÍTIMOS DE DISEÑO .....	54
4.7.2 DISEÑO DE ESTABILIDAD.....	55
4.7.3 DISEÑO HIDRÁULICO.....	55
<b>5 RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
5.1 BASES DE DISEÑO .....	56
5.2 ANÁLISIS BATIMÉTRICO .....	57
5.2.1 CONSTRUCCIÓN DE BATIMETRÍAS.....	57
5.2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO .....	59
5.2.3 EFECTOS DE LA DENSIDAD BATIMÉTRICA EN LA PROPAGACIÓN DE OLEAJE .....	64
5.3 CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE .....	73
5.3.1 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS.....	73
5.3.2 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....	75
5.3.3 TRANSFERENCIA DE OLEAJE.....	78
5.3.4 CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN SITIO DE INTERÉS.....	87
5.3.5 CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN SITIO DE INTERÉS .....	88
5.4 ANÁLISIS DE MAREA Y NIVELES.....	92
5.4.1 CALIDAD DE LA INFORMACIÓN.....	92
5.4.2 MAREA ASTRONÓMICA .....	92
5.4.3 MAREA METEOROLÓGICA .....	96
5.4.4 PROBABILIDADES CONJUNTAS EXTREMAS .....	102
5.4.5 NIVELES DE DISEÑO.....	103
5.5 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE .....	105
5.6 APLICACIÓN CASO PRÁCTICO.....	107

5.6.1	CRITERIOS MARÍTIMOS DE DISEÑO .....	107
5.6.2	DISEÑO DE ESTABILIDAD.....	109
5.6.3	DISEÑO HIDRÁULICO.....	114
<b>6</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>118</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>8</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>137</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>139</b>
<b>10</b>	<b>ANEXO A - BASES DE DISEÑO.....</b>	<b>142</b>
<b>11</b>	<b>ANEXO B - ANÁLISIS BATIMÉTRICO .....</b>	<b>144</b>
<b>12</b>	<b>ANEXO C - CARACTERIZACIÓN DE OLEAJE.....</b>	<b>148</b>
12.1	CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....	148
12.2	CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS .....	151
12.3	TRANSFERENCIA DE OLEAJE AL SITIO DE INTERÉS .....	153
12.4	CLIMA MEDIO DE OLEAJE EN EL SITIO DE INTERÉS .....	155
12.5	CLIMA EXTREMO DE OLEAJE EN EL SITIO DE INTERÉS .....	161
12.6	EVALUACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS DE OLEAJE PARA EL DISEÑO DE OBRAS, SEGÚN MOLINA (2016).....	164
<b>13</b>	<b>ANEXO D - ANÁLISIS DE MAREA Y NIVELES.....</b>	<b>167</b>
13.1	CALIDAD DE LA INFORMACIÓN.....	167
13.2	ANÁLISIS NO ARMÓNICO DE MAREAS .....	168
13.3	ANÁLISIS ARMÓNICO DE MAREAS .....	170
13.4	ANÁLISIS DE LA MAREA METEORÓLOGICA.....	171
13.4.1	ANÁLISIS DE RESIDUO .....	171
13.4.2	EFFECTOS DE LA PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	172
<b>14</b>	<b>ANEXO E - ESTIMACIÓN DE LA ALTURA DE OLEAJE EN LA ZONA ROMPIENTE .....</b>	<b>174</b>
<b>15</b>	<b>ANEXO F - APLICACIÓN CASO PRÁCTICO .....</b>	<b>183</b>
15.1	DISEÑO DE ESTABILIDAD.....	183
15.2	DISEÑO HIDRÁULICO.....	184
<b>16</b>	<b>ANEXO G - EVALUACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>185</b>
16.1	FILTRO, NÚCLEO Y PIE DE APOYO.....	185
16.2	MURO DE CONTENCIÓN.....	186

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Registro de mareas en la bahía de Valparaíso para el mes de enero, año 2016. ....	24
Figura 2: Principales planos mareales. ....	29
Figura 3: Esquema generalizado de un Dique en talud. ....	33
Figura 4: Coeficiente de permeabilidad, Formulación de Van der Meer. ....	37
Figura 5: Área de aplicación Bahía de Valparaíso. El rectángulo amarillo representa los límites establecidos para la comparación de mallas batimétricas.....	42
Figura 6: Ubicación nodo Valparaíso 33.00° S y 73.00° W. ....	43
Figura 7: Esquema de mallas de propagación. ....	45
Figura 8: Estación de monitoreo para el nivel del mar, Valparaíso.....	47
Figura 9: Esquema de definición Setup de oleaje. ....	49
Figura 10: Esquema de parámetros desarrollados en la obtención de la altura de oleaje en zona rompiente. ....	53
Figura 11: Ubicación área de aplicación caso práctico.....	54
Figura 12: Información batimétrica utilizada para la construcción de la Batimetría Completa. Las x representan los vectores de profundidad con una densidad aproximada de 100 puntos por km <sup>2</sup> .....	57
Figura 13: Información batimétrica utilizada para la construcción de la Batimetría Modificada. Las x representan los vectores de profundidad con una densidad aproximada de 3 puntos por km <sup>2</sup> .....	58
Figura 14: Mapa comparativo de veriles cada 20 [m]. En rojo la información de la Batimetría Modificada, en negro los veriles asociados a la Batimetría Completa. ....	59
Figura 15: Diferencias de profundidades en [m], Batimetría Completa y Batimetría Modificada. ....	60
Figura 16: Comparación de profundidades sección transversal a). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).....	61
Figura 17: Comparación de profundidades sección transversal b). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).....	62
Figura 18: Comparación de profundidades sección transversal c). Batimetría Completa (en azul), Batimetría Modificada (rojo), Sondajes CN Batimetría Completa (Negro) y Sondajes CN Batimetría Modificada (Circulo).....	63
Figura 19: Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar Hs= 2.5, Tp= 13 [s] y dirección SW.....	64
Figura 20: Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar Hs= 6.12, Tp= 18 [s] y dirección WSW. ....	65



Figura 21: Diferencias de alturas de ola en [m], para el estado de mar $H_s= 6.13$ , $T_p= 12$ [s] y dirección NNW.....	66
Figura 22: Series de altura de ola a lo largo de la costa para veril de los 10 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). En marcadores azules la Batimetría Completa, en rojo la Batimetría Modificada.....	67
Figura 23: Series de altura de ola a lo largo de la costa para veril de los 20 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). En marcadores azules la Batimetría Completa, en rojo la Batimetría Modificada.....	69
Figura 24: Comparación de distribución de frecuencias para las direcciones SW, WSW y NNW, veril 10 [m].....	71
Figura 25: Comparación de distribución de frecuencias para las direcciones SW, WSW y NNW, veril 20 [m].....	72
Figura 26: Rosa de oleaje Dirección vs Altura.....	74
Figura 27: Rosa de oleaje Dirección vs Periodo.....	74
Figura 28: Oleaje extremo en aguas profundas, tercer cuadrante, Weibull ( $k = 1.0$ ). .....	76
Figura 29: Oleaje extremo en aguas profundas, cuarto cuadrante, Weibull ( $k = 1.4$ ). .....	77
Figura 30: Transferencia de oleaje para la Batimetría Completa, Bahía de Valparaíso. La barra de color indica la altura de ola significativa en [m], para el estado de mar $H_{m0}= 6.13$ [m], $T= 12$ [s], Dirección NNW.....	79
Figura 31: Transferencia de oleaje para la Batimetría Modificada, Bahía de Valparaíso. La barra de color indica la altura de ola significativa en [m], para el estado de mar $H_{m0}= 6.13$ [m], $T= 12$ [s], Dirección NNW.....	79
Figura 32: Ubicación Nodos de Control en aguas someras, Bahía de Valparaíso, frente al paseo Juan de Saavedra. ....	80
Figura 33: Comparación de distribución de frecuencias para los Nodos de Control 1 y 2. 86	
Figura 34: Comparación de los eventos extremos identificados en aguas profundas con los seleccionados en el sitio de interés, cuarto cuadrante, Batimetría Completa.....	89
Figura 35: Comparación de oleaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 1.....	90
Figura 36: Serie del nivel del mar corregida para Valparaíso entre el año 2000 a 2015... 92	
Figura 37: Niveles de marea, Valparaíso, enero 2012. ....	93
Figura 38: Marea astronómica entre los años 2000 a 2015.....	95
Figura 39: Serie de marea meteorológica obtenida (Residuo meteorológico). ....	96
Figura 40: Registro de variaciones del nivel del mar, septiembre 2015.....	97
Figura 41: Marea meteorológica extrema, Weibull ( $k = 1$ ). ....	98
Figura 42: Periodo de retorno conjunto de altura de olas y nivel del mar. ....	102
Figura 43: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional.....	105

Figura 44: Esquema resumen de los criterios preliminares de diseño, utilizados para el pre-diseño de la defensa costera. ....	108
Figura 45: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional. ....	124
Figura 46: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 25 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico. ....	125
Figura 47: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional. ....	128
Figura 48: Comparación secciones tipo de defensa costera (dique en talud). Arriba sección A, representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional. Abajo sección B, representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico. ....	129
Figura 49: Batimetría Completa. La barra de color indica el rango de profundidades en metros. ....	144
Figura 50: Batimetría Modificada. La barra de color indica el rango de profundidades en metros. ....	145
Figura 51: Diagramas de dispersión $H_s$ [m] Batimetría Completa vs $H_s$ Batimetría Modificada para veril de 10 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). ....	146
Figura 52: Diagramas de dispersión $H_s$ [m] Batimetría Completa vs $H_s$ Batimetría Modificada para veril de 20 [m]. Direcciones SW (arriba), WSW (centro) y NNW (abajo). ....	147
Figura 53: Distribución de frecuencias para la Altura significativa. ....	149
Figura 54: Distribución de frecuencias para el Periodo peak. ....	150
Figura 55: Distribución de frecuencias para la Dirección media. ....	150
Figura 56: Comparación de olaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 2. ....	163
Figura 57: Comparación de los eventos extremos identificados en aguas profundas con los seleccionados en cada sitio. Valor círculo indica eventos extremos que no lo son en aguas profundas. ....	164
Figura 58: Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio (rojo) y propagación al sitio de las alturas estimadas en aguas profundas por parámetros medios (negro), tercer (gris)	

y cuarto cuadrante (azul) tanto por selección de máximos anuales (línea continua) como de valores sobre umbral (línea punteada).....	165
Figura 59: Altura significativa asociada a periodo de retorno en los sitios de estudio mediante transferencia espectral de la serie completa al sitio con selección de máximo anual (rojo continua) y valores sobre el umbral (rojo punteada) y propagación al sitio de de las alturas estimadas en aguas profundas divididas por dirección de incidencia tercer cuadrante (gris segmentada) y cuarto cuadrante (negra punteada).....	166
Figura 60: Serie del nivel del mar registrada para Valparaíso entre el año 2000 a 2015.	167
Figura 61: Serie del nivel del mar registrada para Valparaíso año 2008. ....	167
Figura 62: Variación de la presión atmosférica año 2013.....	172
Figura 63: Variación de la presión atmosférica año 2014.....	172
Figura 64: Variación de la presión atmosférica año 2015.....	173
Figura 65: Variación de la presión atmosférica año 2016.....	173
Figura 66: Plano topo-batimétrico sector Juan de Saavedra. ....	174
Figura 67: Plano topo-batimétrico sector Juan de Saavedra. ....	174
Figura 68: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño probabilístico. ....	179
Figura 69: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional.....	179
Figura 70: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño probabilístico .....	180
Figura 71: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Completa. ....	180
Figura 72: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Completa. ....	181
Figura 73: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 25 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Modificada. ....	181
Figura 74: Comparación de alturas de ola en zona rompiente para periodo de retorno 50 años, nivel de diseño convencional versus nivel de diseño probabilístico, Batimetría Modificada. ....	182
Figura 75: Evaluación del coeficiente de shoaling.....	182
Figura 76: Tasa de sobrepaso admisible. ....	184
Figura 77: Recomendaciones para la estimación del peso de los elementos de filtro y núcleo.....	185
Figura 78: Recomendación para la estimación del pie de apoyo de la estructura. ....	186
Figura 79: Tipología de muro de contención considerado.....	186

Figura 80: Presión total y neta de agua a través del muro de contención. ....	187
Figura 81: Empuje de tierra sobre el muro de contención. ....	187

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Corrección por presión atmosférica.....	26
Tabla 2: Constituyentes de marea comúnmente empleadas.....	28
Tabla 3: Coeficientes para la estimación aproximada de las alturas de ola en la zona rompiente.....	32
Tabla 4: Valor $K_D$ para $H = H_s$ . ....	36
Tabla 5: Nivel de daño "S", Formulación de Van der Meer.....	37
Tabla 6: Valores Factor de Rugosidad.....	39
Tabla 7: Características generales de la Grilla batimétrica de propagación. ....	46
Tabla 8: Resumen de valores para los escenarios considerados.....	56
Tabla 9: Características utilizadas en la construcción de las Batimetrías, Análisis Batimétrico.....	58
Tabla 10: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo.....	73
Tabla 11: Oleaje extremo en aguas profundas, Valparaíso, tercer cuadrante. ....	76
Tabla 12: Oleaje extremo en aguas profundas, Valparaíso, cuarto cuadrante. ....	77
Tabla 13: Parámetros propagados en el análisis batimétrico. ....	78
Tabla 14: Coordenadas Nodo bahía de Valparaíso. ....	80
Tabla 15: Resultados propagación parámetros cuarto cuadrante, Nodo de Control 1.....	81
Tabla 16: Resultados propagación parámetros cuarto cuadrante, Nodo de control 2. ....	82
Tabla 17: Matriz de las diferencias de coeficientes de altura para el Nodo de Control 1..	84
Tabla 18: Matriz de las diferencias de coeficientes de altura para el Nodo de Control 2. .	85
Tabla 19: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo, Nodo control 1 Batimetría Completa.	87
Tabla 20: Comparación de valores oleaje extremo en el sitio de interés, Nodo de Control 1. ....	90
Tabla 21: Comparación alturas de diseño aguas profundas vs sitio de interés, Nodo de Control 1. ....	91
Tabla 22: Planos de referencia mareal para Valparaíso entre los años 2000 a 2015 con su probabilidad de ocurrencia dentro de la estadística.....	93
Tabla 23: Planos de referencia mareal complementarios para Valparaíso entre los años 2000 a 2015 con su probabilidad de ocurrencia dentro de la estadística. ....	94
Tabla 24: Marea meteorológica extrema, Valparaíso. ....	98
Tabla 25: Valores anuales de presión atmosférica, Máximos, Medios y Mínimos, Valparaíso. ....	99
Tabla 26: Parámetros iniciales para la sobre elevación del nivel del mar por viento. ....	100
Tabla 27: Parámetros cálculo <i>Set-up</i> de oleaje.....	101

Tabla 28: Niveles de diseño convencional. ....	103
Tabla 29: Niveles de diseño probabilístico. ....	104
Tabla 30: Estimación de alturas de ola en zona rompiente. ....	106
Tabla 31: Peso y Dimensiones de los elementos para un nivel de diseño convencional. ....	109
Tabla 32: Peso y Dimensiones de los elementos, para un nivel de diseño probabilístico. ....	111
Tabla 33: Peso y Dimensiones de los elementos, para un nivel de diseño convencional. ....	112
Tabla 34: Caudal de sobrepaso estimado considerando un nivel de diseño convencional. ....	114
Tabla 35: Caudal de sobrepaso estimado considerando un nivel de diseño probabilístico. ....	116
Tabla 36: Comparación parámetros de diseño para un escenario de 25 años de periodo de retorno. ....	123
Tabla 37: Comparación parámetros de diseño para un escenario de 50 años de periodo de retorno. ....	127
Tabla 38: Vida útiles mínimas para obras o instalaciones de carácter definitivo. ....	142
Tabla 39: Riesgos máximos admisibles. ....	143
Tabla 40: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo. ....	148
Tabla 41: Incidencia conjunta Periodo vs Dirección. ....	149
Tabla 42: Lista de eventos seleccionados para el cuarto cuadrante en aguas profundas. ....	151
Tabla 43: Lista de eventos seleccionados para el tercer cuadrante en aguas profundas. ....	152
Tabla 44: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 1, Batimetría Completa. ....	153
Tabla 45: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 1, Batimetría Modificada. ....	153
Tabla 46: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 2, Batimetría Completa. ....	154
Tabla 47: Matriz coeficientes de altura para el Nodo de Control 2, Batimetría Modificada. ....	154
Tabla 48: Incidencia conjunta de Periodo vs Dirección, Batimetría Completa. ....	155
Tabla 49: Incidencia conjunta de Altura vs Dirección, Batimetría Completa. ....	155
Tabla 50: Incidencia conjunta de Altura vs Periodo, Batimetría Modificada. ....	156
Tabla 51: Incidencia conjunta de Periodo vs Dirección, Batimetría Modificada. ....	156
Tabla 52: Incidencia conjunta de Altura vs Dirección, Batimetría Modificada. ....	157

Tabla 53: Incidencia conjunta de Altura-Periodo.....	157
Tabla 54: Incidencia conjunta de Periodo-Dirección.....	158
Tabla 55: Incidencia conjunta de Altura-Dirección.....	158
Tabla 56: Incidencia conjunta de Altura-Periodo.....	159
Tabla 57: Incidencia conjunta de Periodo-Dirección.....	159
Tabla 58: Incidencia conjunta de Altura-Dirección.....	160
Tabla 59: Lista de eventos seleccionados en el sitio de interés, Nodo de Control 1, Batimetría Completa.....	161
Tabla 60: Lista de eventos seleccionados en el sitio de interés, Nodo de Control 2, Batimetría Completa.....	162
Tabla 61: Comparación de valores de oleaje en el sitio de interés, Nodo de Control 2. .	163
Tabla 62: Comparación alturas de diseño en aguas profundas y sitio de interés, Nodo de Control 2.....	163
Tabla 63: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2010.....	168
Tabla 64: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2011.....	168
Tabla 65: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2012.....	168
Tabla 66: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2013.....	169
Tabla 67: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2014.....	169
Tabla 68: Planos mareales de pronóstico para Valparaíso año 2015.....	169
Tabla 69: Constituyentes armónicas representativas de la localidad de Valparaíso entre el año 2000 a 2015.....	170
Tabla 70: Nivel de Reducción de Sonda calculado para Valparaíso entre los años 2000 a 2015.....	170
Tabla 71: Lista de eventos seleccionados para el estudio extremo de la marea meteorológica.....	171
Tabla 72: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño convencional de periodo de retorno 25 años.....	175
Tabla 73: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño convencional de periodo de retorno 50 años.....	176
Tabla 74: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño probabilístico de periodo de retorno 25 años.....	177
Tabla 75: Estimación de la altura de ola en zona rompiente, nivel de diseño probabilístico de periodo de retorno 25 años.....	178
Tabla 76: Peso y Dimensiones de los elementos para un nivel de diseño probabilístico.	183

## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como finalidad evaluar la sensibilidad de un diseño de obras marítimas a través de la caracterización de los estudios de condiciones naturales. La sensibilidad se obtiene cuantificando, mediante el pre-diseño de una defensa costera, la variación de parámetros y/o metodologías que integran las etapas comunes en los proyectos de obras marítimas.

Con base a información de proyectos que involucran el diseño de obras marítimas, se identificaron y seleccionaron los estudios comunes para este tipo de infraestructura, destacando como condiciones naturales relevantes: batimetría, oleaje, marea, y niveles del mar.

La obtención de resultados comienza con el desarrollo de un análisis batimétrico integral, fundamentado en la construcción de dos batimetrías con variada resolución que permiten, evaluar y cuantificar las diferencias que induce la falta de información batimétrica en la propagación de los modelos de oleaje propuestos para la zona de estudio, obteniéndose por ejemplo, diferencias máximas de hasta 28 [m] en el campo de las profundidades (entre una batimetría y otra), diferencias de profundidad que no se ven reflejadas al momento de utilizar las batimetrías como herramientas de propagación en modelos de oleaje para la estimación de parámetros de diseño, destacando como desigualdades máximas en este ítem (alturas de diseño) valores de 0.10 [m] de altura de ola entre una batimetría y otra.

El oleaje, por otra parte, se abordó mediante los estudios de clima medio y extremo tanto en aguas profundas como para el sitio de interés. Del clima medio, se obtuvo una caracterización completa de los parámetros que conforman este fenómeno, expuestos a través de representaciones gráficas como histogramas, tablas de incidencia, y rosas de oleaje. En cuanto al estudio de clima extremo, se estiman los valores de mayor energía que presenta la estadística, que posteriormente, son evaluados como parámetros de diseño. De este último punto es posible destacar la comparación metodológica realizada en la selección de eventos extremos en aguas profundas versus en el sitio de interés, donde, del total de 36 eventos seleccionados son 17 los considerados como extremos en aguas profundas y que no son identificados como tales en el sitio de interés, mientras, 15 eventos seleccionados como extremos en el sitio de interés no son tomados en cuenta en el análisis realizado en aguas profundas. Estos resultados permiten corroborar que la metodología de evaluación de eventos extremos en aguas profundas y posterior propagación, presenta diferencias en las alturas de ola calculadas, subestimando y sobreestimando este parámetro dependiendo de las características que se le asignan al oleaje propagado.

La marea, se determina considerando las componentes astronómicas y meteorológicas que la conforman, obteniéndose como resultado parámetros que integran los niveles convencionales de diseño. En este análisis la mayor discrepancia de valores ocurre en el residuo meteorológico dependiendo de la metodología utilizada para la caracterización de este fenómeno. Al plantear una metodología que involucre un análisis de valores extremos en función de un periodo de retorno, se obtiene una sobreelevación por efectos meteorológicos de 0.71 [m] y 0.79 [m] para los periodos de retorno de 25 y 50 años



respectivamente, mientras de la determinación de los efectos individuales que conforman la marea meteorológica (por presión atmosférica y viento) se obtienen correcciones de -0.16 [m] asociada a “buen tiempo” y de +0.07 [m] para una condición de “temporal”.

Se desarrollan dos metodologías para la estimación de los niveles de diseño. La primera consiste en la conformación de un nivel sobre la base de los parámetros obtenidos en los estudios de condiciones naturales, nivel de diseño denominado “Convencional” y de valores 3.44 [m] NRS para el periodo de retorno de 25 años y de 4.19 [m] NRS para el periodo de retorno 50 años. La segunda metodología permite la obtención de un nivel de diseño designado como “Probabilístico” y se fundamenta a través de funciones paramétricas denominadas cópulas. De este nivel se obtienen valores de 2.14 [m] NRS para el periodo de retorno de 25 años y de 2.22 [m] NRS para el periodo de retorno 50 años.

Para comprender el comportamiento del oleaje en la zona rompiente y obtener valores de altura de ola al pie de la estructura se utilizó la formulación de Goda (2000), empleada a partir de una combinación de valores de alturas de olas propagadas al sitio de interés y los niveles de diseño convencional y probabilístico para periodos de retorno de 25 y 50 años (parámetros resultantes de las variaciones metodológicas planteadas en párrafos anteriores). Los resultados obtenidos para esta sección dan cuenta de alturas de olas de diseño para una condición post rompiente y progresiva, calculadas para una cota de profundidad de -2.0 [m] NRS.

Finalmente, cada combinación obtenida al variar parámetros y/o metodologías es evaluada y cuantificada para una defensa costera a través de su diseño de estabilidad e hidráulico, y proyectado mediante el diseño de un dique en talud. Un ejemplo de lo mencionado anteriormente se resume en una comparación de secciones tipo de defensa costera, donde “A” representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno de 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional y “B” representa una configuración para un escenario de periodo de retorno de 50 años, Batimetría Modificada y nivel de diseño convencional (ver Figura 47), otro ejemplo es comparar secciones donde “A” representa una configuración diseñada para un escenario de periodo de retorno de 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño convencional y “B” representa una configuración para un escenario de periodo de retorno 50 años, Batimetría Completa y nivel de diseño probabilístico (ver Figura 48).