



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO DE UNA OBRA COSTERA

Javiera Paz Mora González

Marzo 2018

APROBACIÓN

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL DISEÑO DE UNA OBRA COSTERA

Javiera Paz Mora González

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

PATRICIO WINCKLER GREZ
Profesor guía

CLAUDIO HERNÁNDEZ TORO
Docente

MAURICIO MOLINA PEREIRA
Docente

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.

Javiera Mora González

Alumna

Patricio Winckler Grez

Profesor guía

*Dedicado a:
Mis padres, hermanas y nina.*

Agradecimientos a:

Mis amados padres, por su apoyo y amor incondicional.

*Magaly, mi madre, por enseñarme a ser una mujer fuerte y luchadora.
Roberto, mi padre, por ser el roble en quien siempre me podré apoyar.*

*Muri y pollo por siempre estar ahí, “porque si faltara uno el otro
pierde su belleza”.*

*A mis abuelos y nina, que siempre están y estarán
en mis recuerdos.*

A Rick Rick por los cafés compartidos, su paciencia y su ayuda.

*Gussy, enano y Naldito por siempre confiar en mí y
darme su apoyo.*

*A mis cotitas, vice y seba, por hacer estos años de
Universidad inolvidables.*

A cone, gorsda, uli, xino y flako, por los momentos de desestrés.

A Pintish y Naty por llegar a mi vida.

*A mi profesor guía, Patricio Winckler, quien durante todo el proceso de desarrollo de
esta memoria de título me motivo a seguir avanzando.*

*Y, por último, pero no menos importante a todos quienes contribuyeron con la realización
de este proyecto de título: Carlos Cofré (Universidad Técnica Federico Santa María),
Felipe Maldonado, Pablo Abarca y Rodrigo Campos (Universidad de Valparaíso).*

CONTENIDO

RESUMEN	XVIII
1 INTRODUCCIÓN: PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	1
2 OBJETIVOS Y ALCANCES.....	3
2.1 OBJETIVOS.....	3
2.2 ALCANCES	3
3 MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 CAMBIO CLIMÁTICO.....	4
3.2 PANEL INTERGUBERNAMENTAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO	5
3.3 TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS	6
3.4 ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN.....	7
3.5 EL OLEAJE	9
3.5.1 DEFINICIÓN DEL OLEAJE	9
3.5.2 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN	10
3.5.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE	12
3.5.4 ESTADO DE MAR.....	14
3.5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE	15
3.6 MAREAS	17
3.6.1 MAREA ASTRONÓMICA	18
3.6.2 MAREA METEOROLÓGICA	19
3.7 OBRAS COSTERAS.....	20
3.7.1 ROMPEOLAS VERTICALES	20
3.7.2 ROMPEOLAS EN TALUD	21
3.7.3 ROMPEOLAS MIXTOS.....	22
4 METODOLOGÍA.....	24
4.1 RECOLECCIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES	25
4.1.1 PROYECCIONES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE.....	25
4.1.2 BATIMETRÍA.....	33
4.1.3 PROPAGACIÓN DE OLEAJE.....	36
4.1.4 CLIMA EXTREMO.....	41
4.1.5 CLIMA MEDIO	45
4.1.6 WAVE SETUP DEL OLEAJE	47
4.1.7 MAREA ASTRONÓMICA	48
4.1.8 MAREA METEOROLÓGICA	50
4.1.9 NIVEL MEDIO DEL MAR.....	52
4.2 DISEÑO DE ROMPEOLAS EN TALUD: CORRELACIÓN DE VARIABLES	54
4.2.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	54
4.2.2 CRITERIOS DE DISEÑO.....	55
4.2.3 NIVEL DE DISEÑO	57
4.2.4 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD	59
5 RESULTADOS: CARÁCTER PREDICTIVO DE LA INVESTIGACIÓN	65
5.1.1 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD RCP 4.5 Y RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO	65
5.1.2 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD RCP 4.5 Y RCP 8.5 FINALES DE SIGLO	67
5.1.3 COSTOS DE LOS ROMPEOLAS EN TALUD	71
5.1.4 PLANOS DE LOS ROMPEOLAS EN TALUD	72

6	DISCUSIONES	76
7	RECOMENDACIONES	80
8	CONCLUSIONES	82
9	GLOSARIO	86
10	REFERENCIAS	92
11	ANEXOS	98
11.1	PROYECCIONES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE.....	98
11.2	CLIMA EXTREMO	103
11.3	CLIMA MEDIO.....	113
11.4	MAREA ASTRONÓMICA.....	118
11.5	IMPULSORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO	119
11.5.1	FORZAMIENTO RADIATIVO DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	120
11.5.2	FORZAMIENTO RADIATIVO DERIVADO DE LOS AEROSOLES ANTROPÓGENOS.....	121
11.5.3	FORZAMIENTO RADIATIVO DEBIDO LOS CAMBIOS EN LA SUPERFICIE TERRESTRE	122
11.5.4	FORZAMIENTO RADIATIVO DERIVADO DE LOS IMPULSORES NATURALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO	122
11.6	CICLO DEL DIÓXIDO DE CARBONO.....	123
11.7	RETROALIMENTACIONES DEL CLIMA	124
11.8	CRONOGRAMA DE LAS NEGOCIACIONES E HITOS IMPORTANTES REFERENTES AL CAMBIO CLIMÁTICO	125
11.9	VARIACIONES OBSERVADAS A NIVEL MUNDIAL DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	127
11.9.1	CAMBIOS EN EL NIVEL DEL MAR	127
11.9.2	CAMBIOS EN LOS VALORES EXTREMOS DE LOS OCÉANOS	130
11.10	VARIACIONES OBSERVADAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO 130	
11.10.1	NIVEL MEDIO DEL MAR	130
11.10.2	OLEAJE.....	131
11.10.3	MAREA ASTRONÓMICA.....	135
11.10.4	MAREA METEOROLÓGICA.....	137
11.11	PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL MUNDIAL	138
11.11.1	PROYECCIONES EN LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR	138
11.11.2	PROYECCIONES DE LA VARIACIÓN DE LOS VALORES EXTREMOS DEL NIVEL DEL MAR Y DE LAS OLAS 142	
11.12	PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE.....	142
11.12.1	NIVEL DEL MAR	142
11.12.2	OLEAJE.....	146
11.12.3	EVENTOS EXTREMOS DE OLEAJE.....	152
11.13	COMPARACIÓN DE LAS PROYECCIONES DEL IPCC ANTERIORES AL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN CON LAS OBSERVACIONES.....	155
11.14	ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	157
11.14.1	ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNDO	157
11.14.2	ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE	158

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: PRINCIPALES COMPONENTES DE LA MAREA ASTRONÓMICA.....	19
TABLA 2: MODELOS DE INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA.	24
TABLA 3: MODELOS CMIP UTILIZADOS EN LAS PROYECCIONES DE OLEAJE.....	25
TABLA 4: CLASIFICACIÓN DE LOS MCGS.	27
TABLA 5: PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE DATOS HISTÓRICOS Y PROYECCIONES DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA DE OLEAJE.	42
TABLA 6: PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS DATOS HISTÓRICOS Y PROYECCIONES DEL PERIODO <i>PEAK</i> DEL OLEAJE.....	42
TABLA 7: PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LOS DATOS HISTÓRICOS Y PROYECCIONES DE LA DIRECCIÓN <i>PEAK</i> DEL OLEAJE.....	42
TABLA 8: ALTURA SIGNIFICATIVA DE EVENTOS EXTREMOS.	43
TABLA 9: PERIODO DE OLAS DE EVENTOS EXTREMOS.....	43
TABLA 10: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	48
TABLA 11: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	48
TABLA 12: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.	48
TABLA 13: <i>WAVE SETUP</i> ESCENARIO RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.	48
TABLA 14: ANÁLISIS DE VALORES NO ARMÓNICOS DE LA MAREA	50
TABLA 15: EVENTOS EXTREMOS DE MAREA METEOROLÓGICA [M] CON DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO.....	51
TABLA 16: NIVEL DEL MAR Y NIVEL DEL MAR RELATIVO PARA EL AÑO 2040	52
TABLA 17: VIDAS ÚTILES MÍNIMAS PARA OBRAS E INSTALACIONES DE CARÁCTER DEFINITIVO.	56
TABLA 18: RIESGOS MÁXIMOS ADMISIBLES.	57
TABLA 19: INTERPOLACIÓN MAREA METEOROLÓGICA.	58
TABLA 20: INTERPOLACIÓN <i>WAVE SETUP</i>	59
TABLA 21: RESUMEN PARÁMETROS DEL NIVEL DE DISEÑO.	59
TABLA 22: VALORES SUGERIDOS PARA EL COEFICIENTE DE ESTABILIDAD.	62
TABLA 23: VALORES PARA EL ÁREA RELATIVA EROSIONADA.....	63
TABLA 24: PARÁMETROS Y RESULTADOS DISEÑO ROMPEOLAS RCP 4.5 Y 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	66
TABLA 25: PARÁMETROS Y RESULTADOS DISEÑO ROMPEOLAS RCP 4.5 Y 8.5 FINALES DE SIGLO.	68
TABLA 26: DISEÑO DE LOS ROMPEOLAS CON TALUD 1:2 DE LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE FINALES Y MEDIADOS.	70
TABLA 27: PESOS ACTUALES [TN] DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN ROMPEOLAS DE AVENIDA PERÚ. ...	71
TABLA 28: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DATOS HISTÓRICOS.....	98
TABLA 29: PERIODOS Y DIRECCIONES DATOS HISTÓRICOS.	98
TABLA 30: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO. ..	99
TABLA 31: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.	99
TABLA 32: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO. ..	99
TABLA 33: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.	100
TABLA 34: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	100
TABLA 35: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.	100
TABLA 36: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	101
TABLA 37: PERIODOS Y DIRECCIONES DE PROYECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.	101
TABLA 38: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE DATOS HISTÓRICOS.	103
TABLA 39: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.	107
TABLA 40: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.	108
TABLA 41: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	109
TABLA 42: TORMENTAS CLIMA EXTREMO SET DE PROYECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	110
TABLA 43: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES SET DE DATOS HISTÓRICOS.	113
TABLA 44: PERIODOS Y DIRECCIONES SET DE DATOS HISTÓRICOS.	113
TABLA 45: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.	113
TABLA 46: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.	114
TABLA 47: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.	114

TABLA 48: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.	114
TABLA 49: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	114
TABLA 50: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.	115
TABLA 51: ALTURAS SIGNIFICATIVAS Y DIRECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	115
TABLA 52: PERIODOS Y DIRECCIONES RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.	115
TABLA 53: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS DATOS HISTÓRICOS.	116
TABLA 54: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.	116
TABLA 55: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.	117
TABLA 56: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.	117
TABLA 57: PROMEDIOS ANUALES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE PROPAGADOS ESCENARIO RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.	118
TABLA 58: VARIACIÓN ANUAL DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN CHILE.	131
TABLA 59: PROYECCIÓN DE LAS VARIACIONES DE TEMPERATURA MEDIA GLOBAL DEL AIRE EN SUPERFICIE Y DE LA ELEVACIÓN MEDIA MUNDIAL DEL NIVEL DEL MAR PARA EL PERÍODO 2081-2100.	141
TABLA 60: VARIACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE SUPERAR EN 0.5 METROS EL CAMBIO DE Hs12 RESPECTO AL VALOR DE 2010.	148
TABLA 61: EVOLUCIÓN DEL PERÍODO DE RETORNO DE 50 AÑOS DE ALTURA DE OLA SIGNIFICATIVA PARA LOS AÑOS 2040 Y 2070.	154

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: PROYECCIONES Y DATOS HISTÓRICOS DEL FORZAMIENTO RADIATIVO ANTROPOGÉNICO TOTAL MEDIDO EN $[W/M^2]$ RELATIVO A LA ERA PRE-INDUSTRIAL (APROXIMADAMENTE 1765).....	7
ILUSTRACIÓN 2: OPCIÓN DE ADAPTACIÓN: DISMINUCIÓN DE LA PENDIENTE DEL MANTO EXTERIOR.....	8
ILUSTRACIÓN 3: OPCIÓN DE ADAPTACIÓN: RECRECIMIENTO DEL PARAPETO.....	8
ILUSTRACIÓN 4: OPCIÓN DE ADAPTACIÓN: NUEVA BERMA.....	8
ILUSTRACIÓN 5: PARÁMETROS DEL OLEAJE.....	9
ILUSTRACIÓN 6: CLASIFICACIÓN DEL OLEAJE SEGÚN LA FRECUENCIA Y LA FUERZA GENERADORA.....	10
ILUSTRACIÓN 7: GENERACIÓN DEL OLEAJE.....	11
ILUSTRACIÓN 8: PROFUNDIDAD RELATIVA.....	11
ILUSTRACIÓN 9: <i>SHOALING</i> O ASOMERAMIENTO.....	12
ILUSTRACIÓN 10: DIFRACCIÓN Y REFLEXIÓN.....	12
ILUSTRACIÓN 11: RANGO DE PROFUNDIDADES VÁLIDAS PARA DIFERENTES MODELOS HIDRODINÁMICOS....	14
ILUSTRACIÓN 12: REGISTRO DE UN ESTADO DE MAR.....	15
ILUSTRACIÓN 13: SELECCIÓN DE DATOS EXTREMOS.....	16
ILUSTRACIÓN 14: PRINCIPALES PLANOS DE REFERENCIA DE LA MAREA.....	18
ILUSTRACIÓN 15: FENÓMENO DE LA MAREA ASTRONÓMICA.....	18
ILUSTRACIÓN 16: PARTES DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	20
ILUSTRACIÓN 17: ROMPEOLAS VERTICAL.....	21
ILUSTRACIÓN 18: MODOS DE FALLO DE UN ROMPEOLAS VERTICAL.....	21
ILUSTRACIÓN 19: ROMPEOLAS EN TALUD.....	22
ILUSTRACIÓN 20: ROMPEOLAS MIXTO.....	23
ILUSTRACIÓN 21: SUBREGIONES DEL OCÉANO GLOBAL: TROPICAL NORTH INDIAN (TNIO), TROPICAL WESTERN NORTH PACIFIC (TWNP), TROPICAL EASTERN NORTH PACIFIC (TENP), TROPICAL NORTH ATLANTIC (TNAO), TROPICAL SOUTH INDIAN (TSIO), TROPICAL WESTERN SOUTH PACIFIC (TWSP), TROPICAL EASTERN SOUTH PACIFIC (TESP), TROPICAL SOUTH ATLANTIC (TSAO), EXTRATROPICAL NORTH PACIFIC (ETNP), EXTRATROPICAL NORTH ATLANTIC (ETNA), EXTRATROPICAL SOUTH INDIAN (ETSI), EXTRATROPICAL SOUTH PACIFIC (ETSP) Y EXTRATROPICAL SOUTH ATLANTIC (ETSA).....	26
ILUSTRACIÓN 22: NODOS DE EXTRACCIÓN DE SETS DE PROYECCIONES Y SET DE DATOS HISTÓRICOS.....	27
ILUSTRACIÓN 23: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA HISTÓRICOS.....	28
ILUSTRACIÓN 24: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	29
ILUSTRACIÓN 25: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	30
ILUSTRACIÓN 26: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	31
ILUSTRACIÓN 27: ROSAS DE DIRECCIÓN <i>PEAK</i> , PERIODO <i>PEAK</i> Y ALTURA SIGNIFICATIVA RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	32
ILUSTRACIÓN 28: CARTAS NÁUTICAS ELECTRÓNICAS.....	34
ILUSTRACIÓN 29: A) SONDAJES GRILLA MENOR RESOLUCIÓN Y B) MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL.....	35
ILUSTRACIÓN 30: GRILLAS DE CÁLCULO.....	36
ILUSTRACIÓN 31: POSICIÓN DE LOS NODOS DE CONTROL.....	37
ILUSTRACIÓN 32: PROPAGACIÓN ALTURA UNITARIA, PERIODO 13 [s] Y DIRECCIÓN W.....	38
ILUSTRACIÓN 33: PROPAGACIÓN ALTURA UNITARIA, PERIODO 16 [s] Y DIRECCIÓN NW.....	39
ILUSTRACIÓN 34: DIRECCIÓN DEL OLEAJE, PROFUNDIDAD 10 [M].....	40
ILUSTRACIÓN 35: DIRECCIÓN DEL OLEAJE, PROFUNDIDAD 20 [M].....	40
ILUSTRACIÓN 36: COEFICIENTES DE AGITACIÓN, PROFUNDIDAD 10 [M].....	40
ILUSTRACIÓN 37: COEFICIENTES DE AGITACIÓN, PROFUNDIDAD 20 [M].....	41
ILUSTRACIÓN 38: ALTURA SIGNIFICATIVA DE EVENTOS EXTREMOS.....	43
ILUSTRACIÓN 39: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS DE EVENTOS EXTREMOS.....	44
ILUSTRACIÓN 40: DIRECCIÓN DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS DE EVENTOS EXTREMOS.....	44
ILUSTRACIÓN 41: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE SET DE DATOS HISTÓRICOS.....	45

ILUSTRACIÓN 42: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.	45
ILUSTRACIÓN 43: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.	46
ILUSTRACIÓN 44: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 4.5 FINALES DE SIGLO.....	46
ILUSTRACIÓN 45: ROSAS DE PARÁMETROS DEL OLEAJE RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	46
ILUSTRACIÓN 46: ESTUDIO DE MAREA ASTRONÓMICA.....	49
ILUSTRACIÓN 47: FRECUENCIA ACUMULADA [%] DE RANGOS DE LA MAREA.....	50
ILUSTRACIÓN 48: TENDENCIA MEDIA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN EL PERIODO 2040-2070.	52
ILUSTRACIÓN 49: TENDENCIA MEDIA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO EN EL PERIODO 2040- 2070. ...	53
ILUSTRACIÓN 50: VALOR MEDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR EN EL AÑO 2070.	53
ILUSTRACIÓN 51: VALOR MEDIO DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO EN EL AÑO 2070.....	54
ILUSTRACIÓN 52: UBICACIÓN ÁREA DE ESTUDIO.	55
ILUSTRACIÓN 53: COEFICIENTE DE <i>SHOALING</i>	60
ILUSTRACIÓN 54: COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD TEÓRICA.....	62
ILUSTRACIÓN 55: PESO DE LOS ELEMENTOS DEL NÚCLEO, FILTRO Y CORAZA DE UN ROMPEOLAS EN TALUD.	63
ILUSTRACIÓN 56: VALORES DEL CAUDAL MÁXIMO ADMISIBLE.	64
ILUSTRACIÓN 57: DEFINICIONES GEOMÉTRICAS ROMPEOLAS EN TALUD.....	65
ILUSTRACIÓN 58: COMPARACIÓN DE DISEÑOS ROMPEOLAS CON DISTINTOS TALUDES PARA LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE MEDIADOS DE SIGLO.	67
ILUSTRACIÓN 59: COMPARACIÓN DE DISEÑOS ROMPEOLAS CON DISTINTOS TALUDES PARA LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE FINALES DE SIGLO.	69
ILUSTRACIÓN 60: COMPARACIÓN DE LOS PESOS DE LOS ELEMENTOS DE CORAZA DE LOS ROMPEOLAS CON TALUD 1:2 DISEÑADOS BAJO LOS ESCENARIOS RCP 4.5 Y 8.5 DE FINAL Y MEDIADOS DE SIGLO.	70
ILUSTRACIÓN 61: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 4.5 DE MEDIADOS DE SIGLO.	72
ILUSTRACIÓN 62: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 8.5 DE MEDIADOS DE SIGLO.	73
ILUSTRACIÓN 63: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 4.5 DE FINALES DE SIGLO.	74
ILUSTRACIÓN 64: PLANO ROMPEOLAS EN TALUD ESCENARIO RCP 8.5 DE FINALES DE SIGLO.	75
ILUSTRACIÓN 65: COMPARACIÓN DE Hs [M] HISTÓRICAS DE DISTINTOS AUTORES.	77
ILUSTRACIÓN 66: COMPARACIÓN DE Hs [M] PROYECTADAS DE DISTINTOS AUTORES.....	78
ILUSTRACIÓN 67: COMPARACIÓN VALORES EXTREMOS.	79
ILUSTRACIÓN 68: COMPARACIÓN VALORES EXTREMOS CON INTERVALOS DE CONFIANZA.....	79
ILUSTRACIÓN 69: SERIE DE TIEMPO DE EXTREMOS.....	81
ILUSTRACIÓN 70: REPRESENTACIÓN DEL NIVEL DE ACUERDO, EVIDENCIA Y CONFIANZA.	88
ILUSTRACIÓN 71: ESTRUCTURA DE UNA RED NEURONAL COMPETITIVA.	90
ILUSTRACIÓN 72: TRIANGULACIÓN DE DELAUNAY SOBRE UN CONJUNTO DE 10 PUNTOS.....	90
ILUSTRACIÓN 73: SETS DE PROYECCIONES.	102
ILUSTRACIÓN 74: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.	111
ILUSTRACIÓN 75: DIRECCIONES DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 4.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	111
ILUSTRACIÓN 76: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.	111
ILUSTRACIÓN 77: DIRECCIONES DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO.....	112
ILUSTRACIÓN 78: PERIODOS DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS CLIMA EXTREMO RCP 8.5 FINALES DE SIGLO. 112	112
ILUSTRACIÓN 79: DIRECCIONES DE ALTURAS SIGNIFICATIVAS DE CLIMA EXTREMOS RCP 8.5 FINALES DE SIGLO.....	112
ILUSTRACIÓN 80: NIVEL DE MAREA OBSERVADA.....	118
ILUSTRACIÓN 81: NIVEL DE MAREA PRONOSTICADA.	119
ILUSTRACIÓN 82: MAREA METEOROLÓGICA.	119
ILUSTRACIÓN 83: ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL CICLO DEL CARBONO GLOBAL.....	123
ILUSTRACIÓN 84: CONTRIBUCIONES OBSERVADAS EN EL NIVEL DEL MAR.....	129
ILUSTRACIÓN 85: MAPA DE LAS TASAS DE CAMBIO DEL NIVEL DEL MAR GEOCÉNTRICO DURANTE EL PERÍODO 1993-2012.	130

ILUSTRACIÓN 86: ESTACIONALIDAD DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA AMÉRICA LATINA CORRESPONDIENTE A DOS PERÍODOS DE TIEMPO, DESDE 1950 A 2001 Y DESDE 1993 A 2001.	131
ILUSTRACIÓN 87: ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA ESTACIONAL EN EL PERÍODO 1992-2009.	132
ILUSTRACIÓN 88: ALTURA SIGNIFICATIVA MÁXIMA ESTACIONAL CORRESPONDIENTE AL PERÍODO 1992-2009.	133
ILUSTRACIÓN 89: ALTURA SIGNIFICATIVA SUPERADA 12 HORAS AL AÑO EN EL PERÍODO 1948-2008.	134
ILUSTRACIÓN 90: DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA DEL OLEAJE EN EL PERÍODO 1992-2008. ...	134
ILUSTRACIÓN 91: DESCRIPCIÓN DEL CLIMA MARÍTIMO EN CHILE EN EL PERÍODO 1948-2010.	135
ILUSTRACIÓN 92: NIVEL MÁXIMO DE MAREA ASTRONÓMICA EN EL PERÍODO 1948-2008.	136
ILUSTRACIÓN 93: CARRERA DE MAREA ASTRONÓMICA EN EL PERÍODO 1948-2008.	136
ILUSTRACIÓN 94: MAREA METEOROLÓGICA PERTENECIENTE AL CUANTIL MEDIO 0,99 EN EL PERÍODO 1948-2008.	137
ILUSTRACIÓN 95: RANGO DE VARIACIÓN MENSUAL DEL CUANTIL 0,99 DE MAREA METEOROLÓGICA DESDE 1948 A 2008.	137
ILUSTRACIÓN 96: PROYECCIONES DE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL MEDIO GLOBAL DEL MAR.	139
ILUSTRACIÓN 97: PROYECCIONES DEL NIVEL MEDIO RELATIVO NETO REGIONAL DEL MAR PARA EL PERÍODO 2081-2100.	140
ILUSTRACIÓN 98: PROYECCIÓN DEL PORCENTAJE DE DESVIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR REGIONAL PARA EL PERÍODO 2081-2100.	141
ILUSTRACIÓN 99: A) PROYECCIONES MEDIAS DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA EL PERÍODO 2010-2040 Y B) PARA EL PERÍODO 2040-2070.	143
ILUSTRACIÓN 100: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA EL AÑO 2040.	143
ILUSTRACIÓN 101: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE DEL NIVEL MEDIO DEL MAR PARA EL AÑO 2070.	144
ILUSTRACIÓN 102: PROYECCIÓN DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO PARA EL PERÍODO 2010-2040. ...	144
ILUSTRACIÓN 103: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO PARA EL AÑO 2040.	145
ILUSTRACIÓN 104: PROYECCIONES DEL NIVEL MEDIO DEL MAR RELATIVO PARA EL PERÍODO 2040-2070.	145
ILUSTRACIÓN 105: A) VALOR MEDIO E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA AL NIVEL DEL MAR RELATIVO PARA EL AÑO 2070.	146
ILUSTRACIÓN 106: A) VARIACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA SUPERADA 12 HORAS AL AÑO (Hs12) Y B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA PARA EL AÑO 2040.	147
ILUSTRACIÓN 107: A) VARIACIÓN DE Hs12 Y B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA B) PARA EL AÑO 2070.	147
ILUSTRACIÓN 108: PROBABILIDAD DE SUPERAR UN AUMENTO DE 0.5 [M] LA ALTURA SIGNIFICATIVA SUPERADA 12 HORAS AL AÑO PARA DISTINTOS HORIZONTES DE TIEMPO.	148
ILUSTRACIÓN 109: A) VARIACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA MENSUAL E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2040.	149
ILUSTRACIÓN 110: A) VARIACIÓN DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA MEDIA MENSUAL E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2070.	150
ILUSTRACIÓN 111: PROBABILIDAD DE SUPERAR UN AUMENTO DE 0.2 METROS DE HS MEDIA MENSUAL PARA DIVERSOS HORIZONTES DE TIEMPO.	151
ILUSTRACIÓN 112: A) VARIACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2040.	151
ILUSTRACIÓN 113: A) VARIACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL FLUJO MEDIO DE ENERGÍA E B) INCERTIDUMBRE ASOCIADA EN EL AÑO 2070.	152
ILUSTRACIÓN 114: TENDENCIA ESTACIONAL DE LOS EXTREMOS DE OLEAJE A LARGO PLAZO.	153
ILUSTRACIÓN 115: A) VALOR MEDIO DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA CON PERÍODO DE RETORNO 50 AÑOS PARA LOS AÑOS 2040 Y B) 2070.	154
ILUSTRACIÓN 116: COMPARACIÓN DE LAS PROYECCIONES DEL IPCC CON LAS OBSERVACIONES DE: CONCENTRACIONES MEDIAS ANUALES DE CO ₂ (ILUSTRACIONES SUPERIORES), TEMPERATURA MEDIA GLOBAL ANUAL EN SUPERFICIE (ILUSTRACIONES CENTRALES) Y NIVEL MEDIO GLOBAL DEL MAR (ILUSTRACIONES INFERIORES).	157

RESUMEN

El presente proyecto de título aborda la determinación de la influencia del cambio climático en el diseño de una obra costera, basándose en la pregunta ¿Cómo afecta el cambio climático, y en concreto las variaciones de los parámetros de altura significativa de ola, marea meteorológica, nivel medio del mar y eventos meteorológicos extremos, al diseño de los elementos presentes en un rompeolas? A partir de ella surge la hipótesis que las modificaciones en las variables antes mencionadas, debidas al fenómeno de cambio climático, conllevan a aumentos en los pesos y longitudes equivalentes de los elementos presentes en una obra costera. El objetivo general es determinar la influencia del cambio climático en el diseño de una obra costera y los objetivos específicos son: identificar y describir las proyecciones de las variaciones, debidas al fenómeno de cambio climático, del nivel medio del mar, la altura significativa, periodo *peak* y dirección del oleaje, y la marea meteorológica. Junto con esto caracterizar la influencia de la marea astronómica en el nivel del mar y finalmente relacionar las variables antes mencionadas en función del diseño de una obra costera.

El paradigma de investigación es positivista con un enfoque de investigación cuantitativo, el diseño de investigación es no experimental correlacional predictivo y se materializa con una técnica de recolección de datos denominada análisis documental de fuentes secundarias (Hernández *et al.*, 2010). El proceso de trabajo contempla en primer lugar obtener los registros de desnivelaciones del nivel del mar, desde la página *web sea level station monitoring facility* para realizar un análisis de armónicos de la marea mediante la herramienta T-TIDE programada en MATLAB y de esta forma obtener el nivel medio del mar y el nivel de reducción de sonda. Con el mismo registro de desnivelaciones utilizado para la realización del análisis armónico se realiza un análisis no armónico de la marea con la finalidad de obtener los rangos de la marea. Por otra parte, las proyecciones de variación que presentará el nivel medio del mar y los valores extremos de marea meteorológica, debidas al fenómeno de cambio climático para diversos horizontes de tiempo en la costa de Valparaíso son obtenidas desde el documento elaborado por CEPAL (2015). Las tres variables: el nivel medio del mar sumado a las proyecciones de variación del mismo, los rangos de la marea y los valores de marea meteorológica son utilizados para el cálculo del nivel de diseño. Las proyecciones de los parámetros del oleaje para los cuatro escenarios RCP son obtenidas desde la página *web* CSIRO. Estos parámetros son procesados mediante un script en MATLAB para luego propagarlos y de esta forma obtener los coeficientes de agitación. Se realiza también un análisis de clima extremo con el propósito de obtener la altura significativa con periodo de retorno de 70 años, necesaria para realizar el cálculo de la altura significativa de diseño. Una vez conocido el nivel de diseño y la altura significativa de diseño se procede a realizar el cálculo del peso y de la longitud equivalente de los elementos presentes en cada uno de los rompeolas en talud diseñados bajo los cuatro escenarios RCP.

En la actualidad el peso de los elementos que componen la defensa costera de Avenida Perú varía entre las 0.4 y 7.9 [Tn]. Si se compara el peso promedio de los elementos que conforman la coraza del rompeolas actual, es decir 6.3 [Tn], existe un aumento en los pesos de los elementos en todos los escenarios RCP utilizados en esta memoria de proyecto de título.

Lo detallado en el párrafo anterior indica que la hipótesis del presente proyecto de título se verifica. Es decir, el cambio climático conlleva a un aumento en el peso de los elementos que componen un rompeolas en talud.

1 INTRODUCCIÓN: PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

La presente memoria de proyecto de título está centrada en cómo el cambio climático afectará al diseño de los elementos presentes en los rompeolas en talud utilizados como defensas costeras.

El cambio climático es una variación del clima que, sumado a la variabilidad natural del mismo, provoca una alteración en la composición de la atmosfera induciendo un calentamiento generalizado en el planeta. Gracias a la existencia de más observaciones y una mejor comprensión de la respuesta del sistema climático las pruebas científicas son contundentes y permiten concluir que la influencia humana en el calentamiento global es irrefutable. El organismo encargado de proveer evaluaciones en los ámbitos científicos, técnicos y socioeconómicos referentes al cambio climático es el *Intergovernmental Panel on Climate Change* (en adelante IPCC), organismo que en 2014 finalizó el Quinto Informe de Evaluación, desde el cual surgieron cuatro nuevos escenarios de emisiones denominados Trayectorias de Concentraciones Representativas (en adelante RCP, por sus siglas en inglés), los cuales son utilizados para realizar las proyecciones climáticas que son empleadas en este trabajo.

En la actualidad el fenómeno del cambio climático es abordado desde dos grandes áreas: mitigación de Gases de Efecto Invernadero (en adelante GEI) y adaptación a los posibles efectos que el cambio climático tendrá; efectos que ya se aprecian en la actualidad y que abarcan, entre otros, el desarrollo económico y social, la infraestructura, la seguridad energética, la salud humana, los ecosistemas nacionales y el ámbito político. Sin embargo, este trabajo se centra en la adaptación a los impactos que repercutirán de forma directa en la infraestructura costera.

Las obras marítimas y costeras son particularmente frágiles al fenómeno de cambio climático. Por una parte, debido al lugar geográfico donde se emplazan, Chile, considerado un país vulnerable pues cumple con la mayoría de los criterios de vulnerabilidad presentados por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (en adelante CMNUCC), y por otra debido a su larga vida útil. En la actualidad este fenómeno es considerado solo en la fase de operación de las infraestructuras, y no en su fase de diseño o planificación. El presente trabajo busca poner énfasis y concientizar a los organismos competentes en la importancia que tiene la incorporación, en todas las fases de desarrollo de infraestructura costera y por sobre todo en el diseño, de los impactos que tendrá el cambio climático. Al día de hoy el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Departamento de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente, 2014), solo reconoce los posibles impactos que tendrá este fenómeno en la infraestructura, pero aún no elabora un plan para diseñar y/o adecuar las infraestructuras a dichos impactos.

Las consecuencias del fenómeno de cambio climático ya son visibles en el país, observándose un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos meteocéanográficos, exponiendo de esta forma la infraestructura costera. A raíz de esto el presente trabajo explora la incorporación de los efectos que tendrá este fenómeno, concretamente el aumento del nivel medio del mar, variaciones de la marea meteorológica, alteración en los periodos de retorno y la altura significativa de eventos extremos de oleaje

en los elementos que conforman una obra costera. Determinando la influencia que tendrá el cambio climático en los pesos y longitudes equivalentes de los elementos presentes en un rompeolas en talud. Esta determinación se realiza, en primer lugar, mediante la identificación y descripción de los parámetros de diseño susceptibles de variaciones debidas al calentamiento global y en segundo lugar mediante el diseño de una obra de abrigo. Una de las estructuras que se ha visto más afectada, en el último tiempo, por condiciones de oleaje poco frecuentes han sido las localizadas en Valparaíso, debido a esto se ha seleccionado como sitio de estudio el rompeolas ubicado en la Avenida Perú, comuna de Viña del Mar, Región de Valparaíso.

Considerando que la problemática central es la exposición de las obras costeras al cambio climático y que sus antecedentes directos dan cuenta de un aumento en la frecuencia e intensidad de las condiciones extrema, la hipótesis que se plantea es que el cambio climático conlleva a que el peso y longitud equivalente de los elementos dispuestos en la defensa costera del sitio de estudio, deben aumentar con la finalidad de disminuir la exposición de la misma frente a las nuevas condiciones climáticas que traerá el cambio climático, y que ya son visibles en la actualidad.

2 OBJETIVOS Y ALCANCES

2.1 OBJETIVOS

El objetivo general es determinar la influencia del cambio climático en el diseño de una obra costera.

Los objetivos específicos son:

1. Identificar los parámetros de diseño susceptibles de variaciones por cambio climático.
2. Cuantificar las variaciones esperadas de parámetros de diseño en el sitio de estudio.
3. Estimar la variabilidad de los valores extremos bajo distintos escenarios de cambio climático.
4. Relacionar los parámetros que sufrieron variaciones debido al cambio climático, para diseñar una obra costera.

2.2 ALCANCES

Se utilizan proyecciones de la altura significativa (H_S), frecuencia *peak* (F_p) y dirección *peak* (D_p), obtenidas desde la página web *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (en adelante CSIRO). Solo se consideran los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, en dos ventanas de tiempo: una de mediados del siglo XXI que va desde el año 2026 al año 2045 y otra de finales del siglo XXI que contempla desde el año 2081 al año 2100.

Se utilizan solo los parámetros de resumen espectrales del oleaje, correspondientes a H_S , F_p y D_p , sin considerar la información de espectros.

El análisis armónico de la marea se reconoce mediante la estadística mensual que corresponde al mes de agosto del año 2016 obtenida desde la página web *sea level station monitoring facility* (<http://ioc-sealevelmonitoring.org/list.php>).

3 MARCO TEÓRICO

3.1 CAMBIO CLIMÁTICO

Cambio climático se define según CMNUCC como:

“Cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (Stocker et al., 2013, pág. 6).

Las observaciones del sistema climático a escala global comenzaron a desarrollarse a mediados del siglo XIX, en la era industrial. Estas observaciones están basadas en mediciones físicas, bioquímicas y teledetección desde satélites y estaciones terrestres. La medida utilizada para cuantificar y comunicar las diferentes contribuciones al cambio climático es el potencial de cambio de la temperatura global, el cual se basa en la variación de la temperatura media global en superficie en un momento determinado. Esta variación de temperatura se relaciona con el cambio causado por el gas de referencia, dióxido de carbono (en adelante CO_2) y representa la respuesta climática, la eficiencia radiativa de las diferentes sustancias y su período de vida en la atmósfera. Utilizando esta medida de las emisiones es posible evaluar el impacto de las emisiones actuales y pasadas, atribuidas a diferentes actividades, en el clima. De esta forma se puede saber que aquellas actividades que más contribuirán al calentamiento global en los próximos 50 a 100 años serán la energía y la industria. Además, el combustible fósil, el biocombustible doméstico, la quema de biomasa y el transporte por carretera también contribuirán de forma relevante al calentamiento global en esa escala de tiempo. En cuanto al horizonte temporal más cercano (20 años), las emisiones de metano (en adelante CH_4), que son generadas por actividades como ganadería, vertederos o residuos y agricultura, también influirán en el calentamiento global (Stocker et al., 2013).

La influencia humana en el sistema climático es evidente, se ha revelado influencia humana en el calentamiento de la atmósfera y el océano, en las reducciones de los volúmenes de hielo y nieve, en alteraciones en el ciclo del agua, en las variaciones de algunos fenómenos climáticos extremos y en la elevación media mundial del nivel del mar (Stocker et al., 2013). Las proyecciones del cambio climático indican que cerca de un 10% del planeta en el año 2100 sufrirá las consecuencias de este cambio de clima, el cual no solo afectará en el contexto ambiental, sino en casi todas las actividades relevantes para la humanidad, como la salud global, el acceso a agua potable, la seguridad en la alimentación, el uso de la energía, la protección de la biodiversidad e incluso la existencia de algunos países (Urrutia, 2010). Las consecuencias que tendrá el cambio climático en la población no serán iguales para todos los países: la población que se verá más afectada es aquella que se encuentra en países en vías de desarrollo. De esta forma el calentamiento global reproducirá las desigualdades que existen hoy en día, en materias como economía, política y en el ámbito social. En general los países en vías de desarrollo tendrán que sobrellevar los impactos negativos del cambio climático, costeados entre un 75 a un 80% de los costos provocados por los efectos nocivos de las variaciones del clima (de la Cuadra, 2013).

En la actualidad no es posible enfrentar el cambio climático solo con políticas de mitigación, ya que, aunque las emisiones de gases de efecto invernadero disminuyan de forma considerable, las consecuencias del calentamiento acumulado tanto en el océano como en la atmósfera son irreversibles. Por ello hoy en día este tema es tratado tanto con políticas de mitigación, como de adaptación a las futuras variaciones del clima y sus secuelas. En este contexto el debate sobre cambio climático no solo debe estar centrado en las ciencias naturales (climatología, oceanografía, biología, meteorología, física, etc.) sino también en las ciencias sociales, ya que como se mencionó anteriormente, las repercusiones del cambio climático las vivirán en mayor medida aquellas personas y comunidades que poseen mayores carencias, este grupo de personas estarán doblemente expuestas, ya que tendrán que enfrentar no solo las repercusiones del cambio climático, sino también los problemas que derivarán de las variaciones del clima y que estarán asociados a su condición socio-económica (de la Cuadra, 2013).

3.2 PANEL INTERGUBERNAMENTAL SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

El IPCC fue creado por la Organización de Meteorológica Mundial (en adelante OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (en adelante PNUMA), en el año 1988 (Estenssoro, 2010). El IPCC es un órgano intergubernamental y en la actualidad está conformado por todos los países que son miembros de la Organización de las Naciones Unidas (en adelante ONU) y de la OMM, los cuales suman 195. Este órgano está encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático (IPCC, 2016).

En la actualidad el IPCC está compuesto por tres grupos de trabajo y un grupo especial. Estos grupos además cuentan con la asistencia de unidades de apoyo técnico¹. El grupo de trabajo I se preocupa de las bases físicas del cambio climático; el grupo de trabajo II del impacto, la adaptación y la vulnerabilidad; el grupo de trabajo III de la mitigación del cambio climático y el grupo especial se ocupa de los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

Los Informes de Evaluación que realiza el IPCC abarcan todos los aspectos de la evaluación del cambio climático, es decir, abarcan el ámbito científico, técnico y socioeconómico. Generalmente estos informes contienen cuatro partes, tres de ellas correspondientes a cada grupo de trabajo y un informe de síntesis. El IPCC también realiza informes especiales los cuales contienen evaluaciones de temas específicos e informes metodológicos los que proporcionan orientaciones para la elaboración de inventarios de GEI en el marco de la CMNUCC (IPCC, 2016).

¹ La función de las unidades de apoyo técnico es proporcionar soporte en el ámbito científico, técnico y organizativo a sus respectivos grupos de trabajo (IPCC, 2016).

3.3 TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS

Para realizar proyecciones de los cambios del sistema climático se utilizan una serie de modelos climáticos, algunos de ellos sencillos, otros de complejidad intermedia y otros complejos, los cuales son capaces de simular cambios basados en un grupo de escenarios de forzamientos antropógenos (Stocker *et al.*, 2013).

Los nuevos escenarios que fueron utilizados en la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (en adelante CMIP5, por sus siglas en inglés) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas y que fueron incluidos en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC se denominaron RCP. Estos escenarios se utilizaron para realizar las nuevas simulaciones de modelos climáticos. En comparación con la fase tres del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP3) que fue utilizado en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, CMIP5 incluye nuevos modelos del sistema tierra además de los Modelos de Circulación General Atmosfera-Océano (MCGAO), más y mejores experimentos basados en modelos. Además, los modelos de la CMIP5 manejan de forma más exhaustiva los agentes de forzamiento, particularmente aquellos forzamientos como los aerosoles y el uso del suelo. Sin embargo, no existen grandes diferencias en las proyecciones de la temperatura global; de hecho, el valor medio y el rango de los modelos, tanto en una situación transitoria como en equilibrio son muy similares entre los modelos de la CMIP5 y la CMIP3 (Stocker *et al.*, 2013).

En todos los escenarios RCP las concentraciones de CO₂ presentes en la atmósfera son más elevadas en el año 2100 que en la actualidad debido a un mayor aumento en las emisiones acumuladas durante el siglo XXI en la atmósfera. Los RCP incluyen modelos de evaluación integrada que abarcan factores económicos, demográficos, energéticos y climáticos. Además, incorporan concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero, de aerosoles y gases químicamente activos, también del uso del suelo y la cubierta terrestre. Estas trayectorias fueron denominadas representativas, ya que cada una de ellas brinda uno de los numerosos escenarios que conducirían a características específicas de forzamiento radiativo, mientras que la palabra trayectoria hace énfasis en que los niveles de concentraciones a largo plazo son los de interés, pero a su vez, indican el camino seguido para llegar al resultado a largo plazo (Stocker *et al.*, 2013).

Las cuatro RCP que se utilizaron en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC para desarrollar las proyecciones climáticas fueron (Stocker *et al.*, 2013):

- RCP 2.6: El forzamiento radiativo alcanza su valor máximo de aproximadamente 3 W/m² antes del año 2100 y posteriormente disminuye.
- RCP 4.5 y RCP 6.0: Estos dos escenarios representan trayectorias de estabilización, en los que el forzamiento radiativo se estabiliza aproximadamente a 4.5 W/m² y 6.0 W/m² respectivamente después del año 2100.
- RCP 8.5: En este escenario el forzamiento radiativo alcanza valores superiores a 8.5 W/m² en el año 2100 y continúa aumentando durante un tiempo.

En la Ilustración 1 se presentan diferentes escenarios de evaluación anteriores al Quinto Informe de Evaluación del IPCC (SAR IS92a, TAR/AR4 series A1B, A2 y B1) comparados con los escenarios RCP.

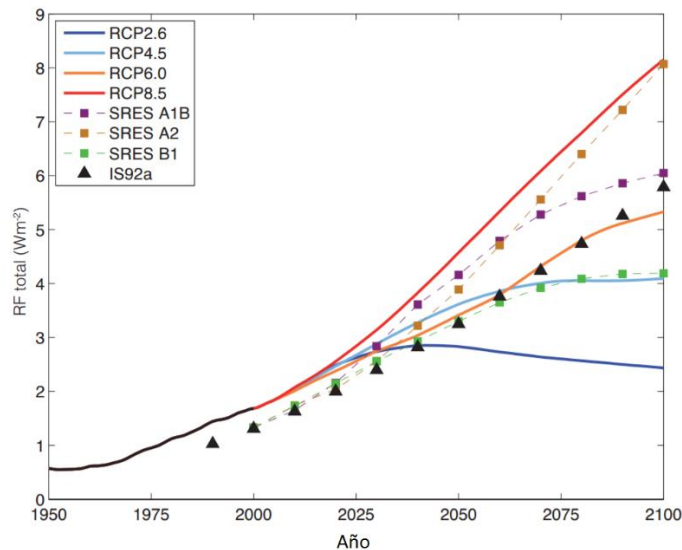


Ilustración 1: Proyecciones y datos históricos del forzamiento radiativo antropogénico total medido en $[W/m^2]$ relativo a la era pre-industrial (aproximadamente 1765). Fuente: (Stocker *et al.*, 2013).

3.4 ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN

La adaptación se define como:

“Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos” (IPCC, 2014, pág. 2).

En general los procesos de adaptación tienen por finalidad reducir la vulnerabilidad futura o de resultado, asociada a los posibles efectos que tendrá el cambio climático, este tipo de vulnerabilidad es dependiente de los escenarios de cambio climático (Vicuña *et al.*, 2013).

La mitigación, por su parte, es definida como:

*“Intervención humana encaminada a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero, al igual que otras sustancias que pueden contribuir directa o indirectamente a la limitación del cambio climático, entre ellas, por ejemplo la reducción de las emisiones de partículas en suspensión que pueden alterar de forma directa el balance de radiación o las medidas de control de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes que pueden alterar la concentración de ozono troposférico, el cual tiene un efecto indirecto en el clima” (Mach *et al.*, 2014, pág. 9).*

Debido a que este proyecto de título se basa solo en proponer medidas de adaptación en el diseño de infraestructura costera debido a los efectos del cambio climático, materias de mitigación y de adaptación en otras áreas que no sean infraestructura no serán abordadas. Existen cuatro categorías para abordar la adaptación al cambio climático, estas son: Adaptación preventiva, reactiva, autónoma y planificada. En este caso se adopta la adaptación planificada, la cual involucra tanto el diseño como la implementación directa de medidas, a través de un mayor nivel de conocimiento sobre los riesgos, impactos y medidas disponibles, con la finalidad de enfrentar el cambio climático (MMA, 2013).

En la Ilustración 2, Ilustración 3 e Ilustración 4 se muestran ejemplos de diferentes opciones de adaptación para una sección de dique en talud en condiciones de aumento del nivel del mar y/o del oleaje. Estas opciones tienen por finalidad reducir el sobrepaso mediante una variación en la pendiente del talud, un aumento de la cota de coronación del parapeto o la inclusión de una berma (Vicuña *et al.*, 2013).

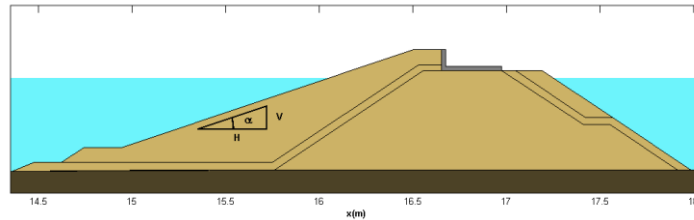


Ilustración 2: Opción de adaptación: Disminución de la pendiente del manto exterior.
Fuente: (Losada, 2012).

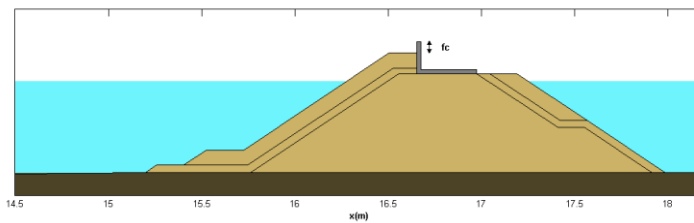


Ilustración 3: Opción de adaptación: Recrecimiento del parapeto.
Fuente: (Losada, 2012).

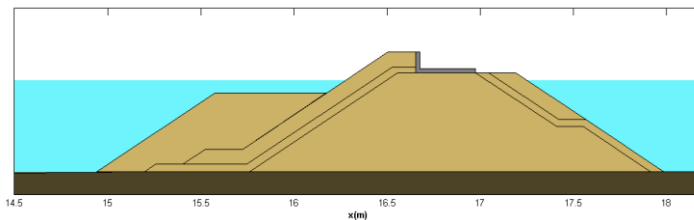


Ilustración 4: Opción de adaptación: Nueva berma.
Fuente: (Losada, 2012).

3.5 EL OLAJE

3.5.1 DEFINICIÓN DEL OLAJE

El oleaje es generado por distintas fuerzas de la naturaleza, la más usual, el viento. Dependiendo de la fuerza generadora, las cuales pueden ser visualizadas en la Ilustración 6, se inducen diferentes tipos de olas (Silva, 2005).

El oleaje es considerado un proceso aleatorio, ya que, las olas no son regulares. Puede ser definido como un conjunto de ondas viajando con diferentes amplitudes, frecuencias, fases y direcciones. Los parámetros característicos del oleaje son: altura (H), periodo (T) y dirección, los cuales pueden ser visualizados en la Ilustración 5. El primer parámetro se define como la distancia vertical que existe entre el valle y la cresta de la onda, el segundo es el tiempo que transcurre hasta que se observa el paso de dos crestas o dos valles consecutivos en un punto idéntico de la superficie libre, y el tercer parámetro, como su nombre lo indica, es la dirección de propagación del oleaje, es decir, la dirección con que incide el oleaje (Silva, 2005).

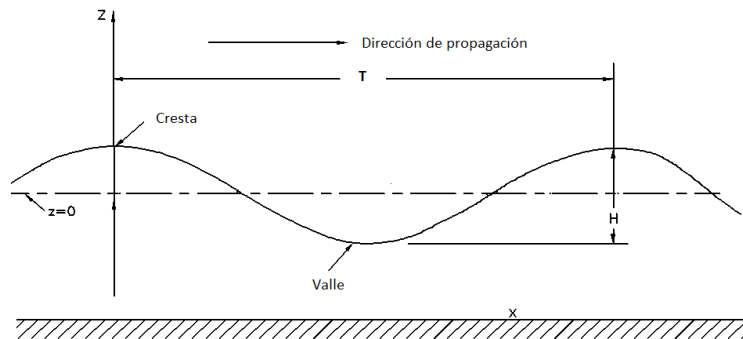


Ilustración 5: Parámetros del oleaje.
Fuente: Adaptado desde (USACE, 2011).

Otras magnitudes características del oleaje son la longitud (L) y la celeridad (c). La longitud es la distancia horizontal más pequeña entre dos puntos sucesivos idénticos de una onda, es decir, dos valles o dos crestas sucesivas. Mientras que la celeridad es la velocidad a la que se propaga el oleaje y depende de la longitud y el periodo de la onda (G.I.O.C, 2000).

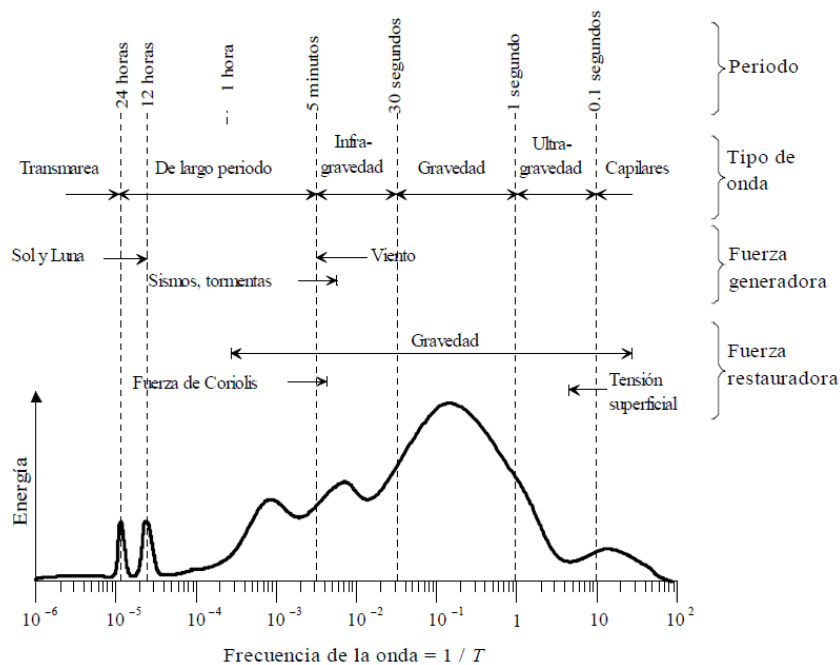


Ilustración 6: Clasificación del oleaje según la frecuencia y la fuerza generadora.
Fuente: (Silva, 2005).

3.5.2 GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN

Existen numerosas teorías para explicar la generación del oleaje, sin embargo, todas ellas se basan en la interacción entre el viento y la superficie del mar.

El oleaje es generado por la turbulencia del viento en la capa límite de la superficie de agua. Esta turbulencia crea perturbaciones, las que luego crecen y son empujadas en la misma dirección que sopla el viento. Estas perturbaciones son denominadas ondas capilares, y son esenciales para la generación del oleaje, sin embargo, no tienen un papel primordial en la evolución del mismo (Beyá, 2014).

Las olas que están situadas en el área de generación, o cerca de esta, se denomina oleaje local o mar de viento e internacionalmente se denomina sea. Este tipo de oleaje posee un rango de periodos entre los 4 a 8 [s] en las costas de Chile (SHOA, 2005), es de gran irregularidad, relativamente caótico, carece de periodos bien definidos, tiene direcciones de propagación variables en un amplio rango alrededor de la dirección del viento generador y posee una gran desigualdad entre la forma de la cresta y del valle. A medida que el oleaje se aleja de la zona de generación se produce una separación de los trenes de ondas, debido a dos fenómenos: la dispersión radial y la dispersión angular. El primer fenómeno tiene relación con que las ondas de mayor periodo, cuya celeridad es mayor, adelantan a aquellas ondas de menor periodo produciéndose una dispersión radial en la dirección de propagación del oleaje. La dispersión angular tiene relación con la separación del oleaje, en las diferentes direcciones en el rango de la dirección dominante (o dirección con que las ondas abandonan el área de generación) (G.I.O.C, 2000). El oleaje que sufre dispersión angular y radial, y que, abandona el área de generación se denomina oleaje distante o mar

de fondo y es conocido internacionalmente como *swell*. Algunas características de este tipo de oleaje es que poseen un periodo entre 10 a 25 [s] en las costas de Chile (SHOA, 2005), es más regular que el oleaje sea, las diferencias entre periodos y longitudes de onda son mínimas y presentan algunas direcciones predominantes (Silva, 2005).

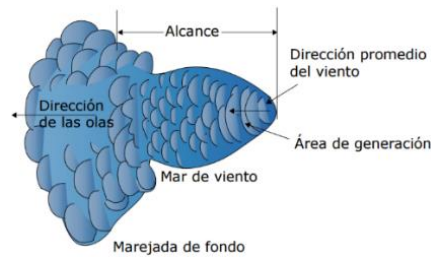


Ilustración 7: Generación del oleaje.
Fuente: (Carta *et al.*, 2009).

Al aproximarse a la costa el oleaje comienza a sentir el fondo, en base a la teoría lineal esto sucede cuando la profundidad relativa $d/L < 1/2$, donde d es la profundidad y L la longitud de onda. La profundidad relativa es un parámetro adimensional del oleaje que expresa la penetración del movimiento de la ola con la profundidad (G.I.O.C, 2000).

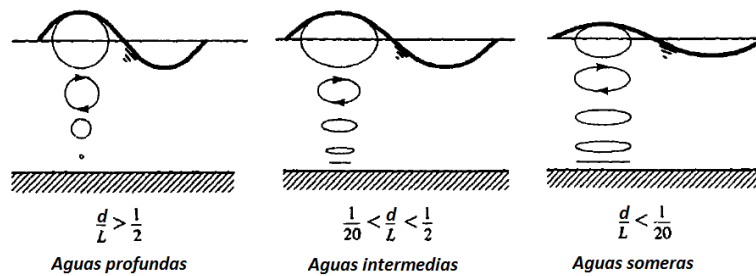


Ilustración 8: Profundidad relativa.
Fuente: Adaptado desde (G.I.O.C, 2000).

Debido a la interacción del oleaje con el fondo se desarrollan varios procesos, los que en general, tienen como consecuencia variaciones en la altura de la ola y en la dirección de propagación. Uno de estos procesos se denomina asomeramiento o *shoaling* y tiene como resultado un aumento en la altura de la ola y una disminución de su longitud a medida que disminuye la profundidad. La refracción es otro proceso que se desarrolla cuando el oleaje comienza a acercarse a la línea de costa. Se manifiesta como un giro del frente del oleaje producido por las diferentes celeridades entre la parte de la ola que se desplaza en aguas más profundas, que viaja con mayor celeridad, con aquella que se encuentra en una menor profundidad. Este fenómeno produce disminuciones en la altura de la ola y variaciones en la dirección de incidencia del oleaje. La difracción es otro proceso que tiene lugar en la propagación del oleaje hacia la costa. Este fenómeno ocurre por la presencia de obstáculos naturales (como islas) o artificiales (como rompeolas) y produce una transferencia lateral de la energía del oleaje, es decir, en la dirección perpendicular a la dirección de propagación. Otro de los procesos que tiene relación con obstáculos, tanto naturales como

artificiales, es la reflexión, la cual genera una variación abrupta de la dirección en la propagación del oleaje (G.I.O.C, 2000).

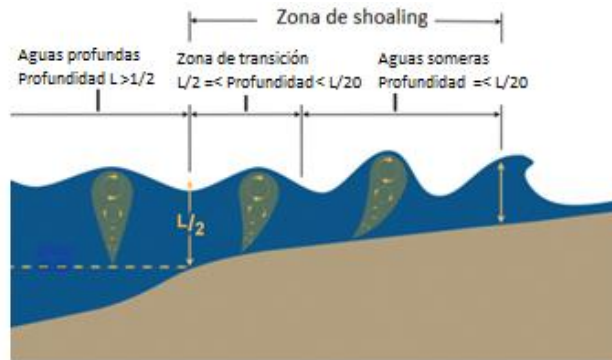


Ilustración 9: Shoaling o asomeramiento.

Fuente: Adaptado desde la página web <http://stream1.cmatc.cn/pub/comet/CoastalWeather/sww/comet/marine/SWW>

En la Ilustración 10 a) se presentan los fenómenos de difracción y reflexión. La difracción se presenta por una barrera artificial. Mientras que en la Ilustración 10 b) se expone la difracción por una barrera natural.

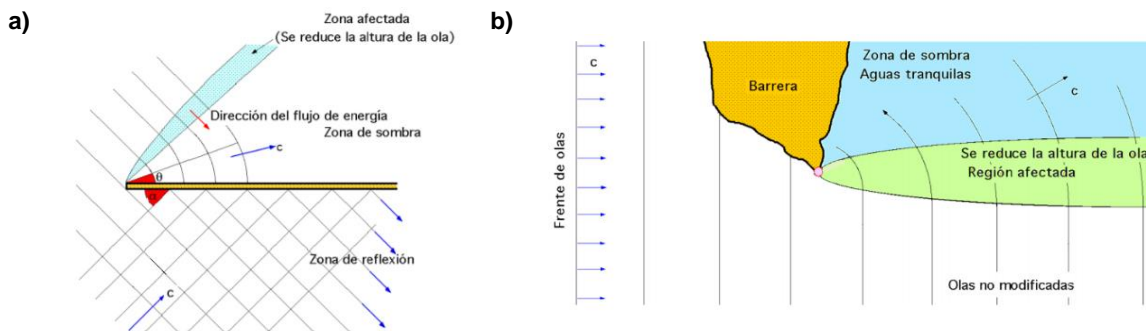


Ilustración 10: Difracción y reflexión.

Fuente: Adaptado desde la página web <http://es.pfernandezdiez.es>

A medida que disminuye la profundidad, la velocidad de las partículas que se encuentran en la cresta de la ola se acercan a la celeridad de ola. Cuando esta celeridad es superada la ola se vuelve inestable, pierde su forma y se produce la rotura. Los tipos de rotura de ola son: oscilación, colapso, voluta y descrestamiento (G.I.O.C, 2000).

3.5.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN DE OLAJE

Existen dos grandes categorías de modelos de propagación y pronóstico de oleaje, estos son:

- Modelos simples, empíricos o paramétricos: Son modelos básicos con los cuales se pueden realizar cálculos rápidos de los parámetros de las olas. Algunos ejemplos

son el *Revised Shore Protection Manual* (RSPM), el método de Donelan y las tablas y nomogramas expuestos en el *Coastal Engineering Manual* (CEM) (Guisado *et al.*, 2010).

- Modelos complejos o computacionales: Este tipo de modelos se clasifican en dos grandes grupos: modelos que resuelven la fase y modelos que promedian la fase. Debido a que en este proyecto de título se utiliza un modelo computacional, estos tipos de modelos se detallan a continuación.

3.5.3.1 Modelos computacionales

- Los modelos que resuelven la fase están basados en las ecuaciones no estacionarias de conservación de masa y cantidad de movimiento integradas verticalmente. Este tipo de modelos son utilizados en áreas pequeñas, del orden de kilómetros, y no consideran los fenómenos de generación ni disipación del oleaje. Algunos de estos modelos son FUNWAVE 2D, MIKE 21 (BW), el modelo RED/DIF, el modelo REFRAC, entre otros (Guisado *et al.*, 2010).
- Los modelos que promedian la fase están basados en las ecuaciones de conservación de la energía espectral, asumiendo que las propiedades del oleaje varían lentamente con la longitud de la onda. Estos modelos son utilizados en áreas extensas y a diferencia de los modelos que resuelven la fase, consideran los fenómenos de generación, disipación de energía y las interacciones no lineales del oleaje. Los modelos que promedian la fase se pueden subclasificar en modelos de primera, segunda y tercera generación. Los modelos de primera generación no incluyen los efectos de las interacciones no lineales entre las ondas, los modelos de segunda generación si incluyen las interacciones no lineales, pero tienen limitaciones en la transferencia no lineal de energía y en los modelos de tercera generación los procesos y términos no lineales son calculados completamente, además de representar de forma eficiente el transporte de energía. Entre los modelos que promedian la fase se encuentran el modelo WAM, WAVEWATCH III, STWAVE, MIKE 21 (SW) y SWAN (Guisado *et al.*, 2010).
- El modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) fue desarrollado por la Universidad de Delft. Este modelo se basa en la resolución de la ecuación de conservación de la energía espectral representando la evolución del espectro e integrando las condiciones de viento, oleaje, corrientes y batimetría. Debido a que es un modelo de tercera generación incorpora procesos de generación, disipación e interacciones no lineales (Guisado *et al.*, 2010). Como se expone en la Ilustración 11 SWAN puede ser utilizado en cualquier rango de profundidad donde predomine la generación de oleaje por la acción del viento. Sin embargo, fue diseñado para ser utilizado en escalas costeras, ya que incorpora procesos como asomeramiento, difracción, refracción, disipación por fricción del fondo, rotura, etc. Este modelo incluye la posibilidad de realizar anidamientos para modelar en primer lugar zonas más extensas y luego en una región más pequeña, con la finalidad de una mayor precisión y poder aplicarlo a escalas reducidas (Delft University of Technology, s.f.).

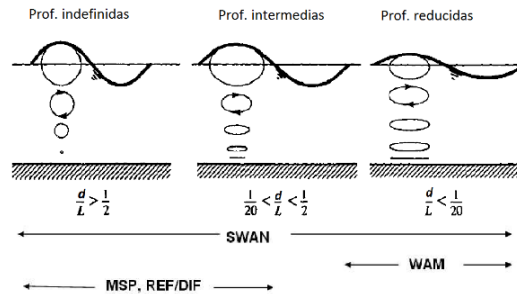


Ilustración 11: Rango de profundidades válidas para diferentes modelos hidrodinámicos.
Fuente: Adaptado desde (G.I.O.C, 2000).

3.5.4 ESTADO DE MAR

Debido al coste computacional que requieren los registros de las variaciones de la superficie libre es que se utiliza la definición de estado de mar. El estado de mar es aquel intervalo de tiempo en el que se puede suponer que las muestras de las variaciones de la superficie del mar son estacionarias², ergódicas³ y que en ellas se incluyen un número representativo de olas. Este intervalo de tiempo, según la publicación N°3201 del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (en adelante SHOA), es máximo 3 horas, con un periodo de muestreo mínimo de 18 minutos. Los parámetros estadísticos que se obtienen de un estado de mar se asumen como representativos de todo el intervalo de tiempo (Silva, 2005).

El análisis del oleaje se puede realizar mediante dos métodos diferentes:

- **Análisis estadístico temporal:** Este análisis se enfoca en las propiedades estadísticas, distribuciones y parámetros de una serie de tiempo, la cual puede ser representada como se muestra en la Ilustración 12. Los parámetros estadísticos (o parámetros de resumen) relevantes son la variación del nivel medio del mar, la varianza de la superficie de agua, la altura y el periodo medio. Otros parámetros relevantes son la altura significativa y el periodo significativo, la cual representa el promedio del 33% de las alturas de olas más altas y el promedio de los periodos relacionados al 33% de las olas más altas del registro, respectivamente (Silva, 2005).

Con este análisis los registros de las variaciones de la superficie libre se sustituyen por un registro de información estadística, discreta en el tiempo, correspondiente a los estados de mar (G.I.O.C, 2000).

² En este contexto, que las variaciones de la superficie libre sean estacionarias tiene relación con una condición de equilibrio entre las fuerzas restauradoras y las fuerzas generadoras que están presentes en el fenómeno de generación del oleaje.

³ La ergodicidad del fenómeno tiene relación con que el valor medio y la función de autocorrelación (función que mide la autocorrelación entre los valores de las series que se encuentran a ciertos intervalos de distancia), es decir, las propiedades estadísticas del oleaje no varían si son calculados sobre diferentes muestras.

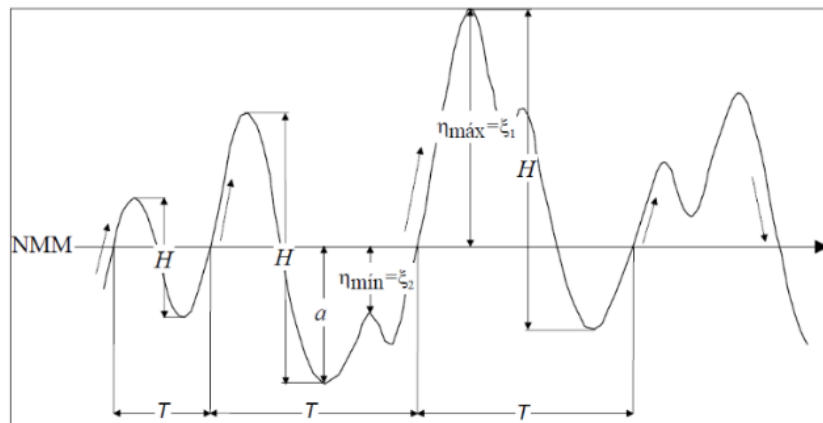


Ilustración 12: Registro de un estado de mar.
Fuente: (Silva, 2005).

- Análisis estadístico espectral: El objetivo de este tipo de análisis es encontrar la función de densidad espectral, la cual representa la energía total asociada a cada uno de los trenes de onda que integran un registro de oleaje (G.I.O.C, 2000). El registro de oleaje se representa como una suma de numerosas ondas sinusoidales. En este análisis los parámetros espectrales (como la altura media cuadrática, altura de ola de momento de orden cero, periodo medio de orden uno y dos) se obtienen a partir de sus momentos, los cuales dependen de la densidad espectral y la frecuencia (Silva, 2005).

3.5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL OLEAJE

El análisis estadístico del oleaje es fundamental en ingeniería marítima y costera, ya que permite conocer las condiciones medias o de mayor ocurrencia y extremas (más energéticas) o menos frecuentes del oleaje, denominadas oleaje reinante o de operación y oleaje dominante o de diseño, respectivamente. Conociendo estas condiciones se puede determinar, entre otras cosas, la operación, seguridad y navegación de buques y establecer procesos de erosión y sedimentación costera.

La base de datos que se utilice para la realización de este tipo de análisis puede estar representada por parámetros estadísticos, o bien, por espectros. La duración de esta base de datos debe ser de a lo menos 20 años, según la publicación N°3201 del SHOA, con la finalidad de tener una descripción completa y detallada del oleaje.

Cuando no se cuente con una base histórica de datos que posea la suficiente duración, o bien la data se encuentre incompleta es posible recurrir a *hindcasting* o reanálisis de oleaje. El método conocido como *hindcasting* son predicciones, a largo plazo, del oleaje que están basadas en información histórica de campos de viento (estaciones meteorológicas o cartas sinópticas) y/o de presiones. Los valores pronosticados mediante esta metodología deben ser calibrados mediante la comparación con mediciones de olas realizadas in situ (BENTOS, s.f.).

3.5.5.1 Clima medio del oleaje

Este análisis tiene como objetivo determinar el comportamiento estadístico diario, mensual, anual e interanual que presentan los parámetros de resumen del oleaje en un sitio de interés (SHOA, 2005).

3.5.5.2 Clima extremo del oleaje

El análisis de clima extremo tiene por finalidad determinar el comportamiento futuro de las condiciones extremas del oleaje, es decir, determinar la probabilidad de que una condición extrema de estados de mar no supere un valor determinado, que pueda provocar el fallo de la estructura. Con este análisis se pueden dimensionar los elementos resistentes de tal forma de soportar, con un determinado nivel de incertidumbre, durante toda la vida útil las solicitaciones del oleaje (G.I.O.C, 2000).

Las instrucciones oceanográficas N°1 del SHOA (2005), indican que una vez obtenida la base de datos de duración no menor a 20 años de aguas profundas, se deben aislar las mayores tormentas ocurridas en el tiempo de duración de la data. Este procedimiento se puede desarrollar mediante dos metodologías: Máximos anuales y valores sobre un umbral o POT (*Peak Over Threshold*). La primera metodología consiste en seleccionar la máxima altura significativa por cada año de duración de la base de datos, mientras que la segunda, define las tormentas de acuerdo a la superación de un determinado umbral de altura significativa. En la metodología POT se debe tener especial cuidado de no seleccionar dos alturas significativas que provengan de la misma tormenta, y, el umbral se debe seleccionar de tal manera que el número de alturas significativas de la muestra sea igual o mayor al número de años de duración de la base de datos. En la Ilustración 13 se presentan ambas metodologías para la selección de las mayores tormentas utilizadas para el análisis de clima extremo.

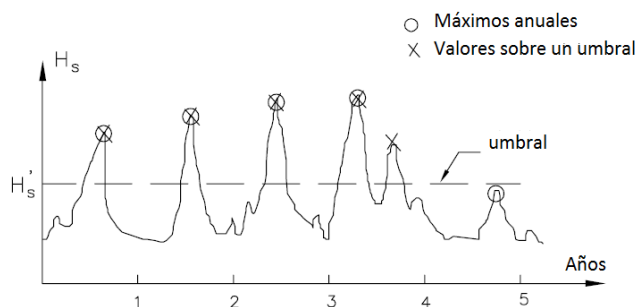


Ilustración 13: Selección de datos extremos.
Fuente: Modificado desde (Liu & Frigaard, 2001).

Una vez obtenido el registro de las mayores tormentas mediante cualquiera de las dos metodologías descritas anteriormente, este debe ser ordenado desde la mayor altura significativa a la menor, para luego someterlo a un ajuste estadístico de acuerdo a diversas distribuciones de probabilidad. Las distribuciones que mejor se ajustan a los registros extremos (distribuciones candidatas) son: La distribución exponencial, Weibull, Frechet, log-normal y Fisher-Tippett type I (FT-I) también denominada Gumbel. A priori no es posible definir cuál de estas distribuciones de probabilidad representa mejor el comportamiento

estadístico de los valores extremos, por lo que se evalúa la función de correlación (R^2), la cual puede ser determinada mediante dos metodologías: ajuste gráfico y máxima verosimilitud. La primera metodología obtiene la probabilidad de no excedencia⁴ a través de distribuciones de probabilidad de ploteo, las cuales dependen de la distribución candidata. La segunda metodología consiste en determinar de forma directa los parámetros de escala (A) y de forma (B) de las distribuciones candidatas. Finalmente se calcula la altura significativa de diseño correspondiente a un periodo de retorno determinado. El periodo de retorno se define como aquel intervalo de tiempo más probable en el que ocurra o sea excedido un evento de oleaje extremo. Debido a que todo el procedimiento de la estimación del valor extremo asociado a un periodo de retorno se realiza de forma estadística se debe tener presente que existirá un error de estimación, el cual genera que el valor extremo sea subestimado o sobreestimado. Para minimizar esta falencia es usual realizar un cálculo de bandas de confianza para diversos porcentajes de confiabilidad (Liu & Frigaard, 2001).

El resultado del análisis estadístico de los valores extremos debe arrojar una estimación de la altura significativa con periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años y debe incluir el periodo *peak* y la dirección asociados a dichas alturas (SHOA, 2005).

Se recomienda utilizar el libro “*Generation and analysis of random waves*” (Liu & Frigaard, 2001), para el detalle de las formulaciones necesarias para el análisis de clima extremo.

El periodo relacionado con las alturas de olas de un análisis de clima extremo se puede conocer mediante la ecuación (1) citada en (Goda, Revisiting Wilson’s formulas for simplified wind-wave prediction, 2003).

(1)

$$T_s = 3.69(H_s)^{0.63}$$

3.6 MAREAS

Las mareas, al igual que los tsunamis, se consideran ondas largas, ya que, la longitud de este tipo de ondas es mayor que la profundidad a la que se propagan. La característica principal de las mareas es que poseen un periodo mayor a 30 [s] (G.I.O.C, 2000).

Los planos de referencia de la marea son presentados en la Ilustración 14, y pueden ser obtenidos mediante un análisis no armónico, el cual permite comprender el comportamiento de la marea a través del registro de ascenso y descenso periódico del nivel del mar. La publicación N°3202 del SHOA recomienda que el registro a utilizar en el análisis no armónico no sea inferior a 30 días para asegurar la ocurrencia de las cuatro fases lunares (Luna nueva, Luna llena, cuarto creciente y cuarto menguante). De este análisis se conocen, entre otros, el máximo y mínimo nivel de la onda de marea, denominados pleamar y bajamar, respectivamente, el nivel medio del mar, el nivel medio de la marea y el nivel de reducción de sonda (SHOA, 1999).

⁴ La probabilidad de no excedencia es la probabilidad de que un evento, en este caso un evento extremo, no sea igualado o superado.

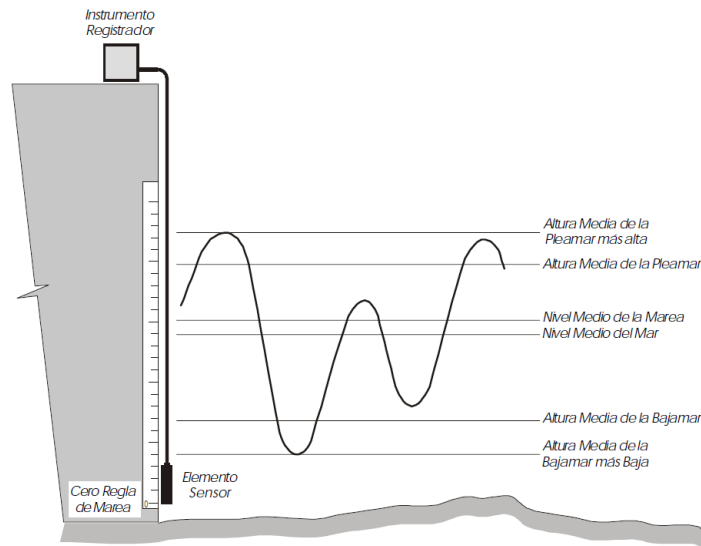


Ilustración 14: Principales planos de referencia de la marea.
Fuente: (SHOA, 1999).

3.6.1 MAREA ASTRONÓMICA

El estudio y análisis de la marea astronómica es un factor importante a considerar en el diseño y construcción de obras de infraestructuras marítimas y costeras, ya que provoca cambios periódicos en la elevación de la superficie del océano, con periodos cercanos a las 12 o 24 [h]. Este tipo de marea es producida por los efectos gravitacionales de los astros, específicamente del sistema Tierra-Luna-Sol. Los planetas también ejercen este efecto gravitacional, pero comparado con el de la Luna o el Sol es despreciable (G.I.O.C, 2000).

En la Ilustración 15 se observa que en las fases de Luna llena o nueva la Luna esta alineada con el Sol, por lo que suman sus fuerzas resultando mareas de mayor intensidad, es decir, mayores pleamares y menores bajamares, conocidas como mareas vivas. En las fases de cuarto menguante o cuarto creciente de la Luna los tres astros no se encuentran alineados, los efectos de la Luna y el Sol están desfasados, esta condición se conoce como mareas muertas.

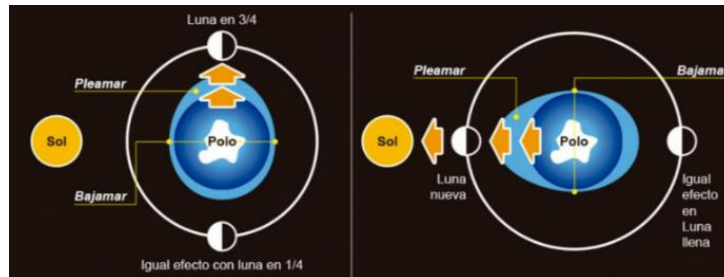


Ilustración 15: Fenómeno de la marea astronómica.
Fuente: Modificado desde <http://www.astronomiaenchile.cl/index.php/astronomia/sol-tierra-y-luna/que-produce-las-mareas>.

Para realizar un análisis de marea astronómica, se realiza una descomposición asumiendo que las fuerzas generadoras causadas por la Luna, la Tierra y el Sol son producidas por un número finito de planetas ficticios. Cada uno de estos planetas ficticios o la combinación de varios de ellos representan la frecuencia de una determinada perturbación astronómica y son identificados por una letra y un subíndice que indica el número de oscilaciones de la componente durante, aproximadamente, 24 [h] (un día solar) (G.I.O.C, 2000). En la Tabla 1 se incluyen las componentes armónicas más importantes de la marea astronómica.

Tabla 1: Principales componentes de la marea astronómica.

Nombre	Símbolo	Periodo [h]
Lunar principal	M_2	12.42
Solar principal	S_2	12
Elíptico lunar mayor	N_2	12.66
Semidiurno luni-solar	K_2	11.97
Solar elíptico mayor	T_2	12.01
Solar elíptico menor	L_2	12.19
Elíptico lunar 2° orden	$2N_2$	12.91
Diurno luni-solar	K_1	23.93
Diurno lunar principal	O_1	25.82
Diurno solar principal	P_1	24.07
Elíptico lunar mayor	Q_1	26.87
Elíptico lunar menor	M_1	24.84
Quincenal lunar	M_f	327.9
Mensual lunar	M_m	661.3
Semi-lunar solar	S_{ea}	4383

Fuente: (G.I.O.C, 2000).

La predicción y descripción de la marea astronómica en un sitio específico puede realizarse mediante un análisis armónico, el cual consiste en determinar las amplitudes y las fases de las componentes armónicas a partir de un registro de marea. El número de constituyentes que se deben incluir en el análisis armónico dependerá de la exactitud que se requiera, sin embargo, deben incluirse al menos 30, si la longitud de la data corresponde a 369 días (Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, 2014-2015). La metodología usualmente utilizada para realizar análisis armónicos se especifica en Foreman (1977).

3.6.2 MAREA METEOROLÓGICA

Esta marea tiene su origen en las variaciones periódicas del viento y la presión atmosférica, el nivel de elevación que alcanza este tipo de marea depende de la época del año y de la localidad en estudio, como ejemplo, un aumento de un milibar de presión atmosférica induce una disminución de un centímetro en el nivel del mar. En Chile estos componentes meteorológicos son de gran relevancia de Puerto Montt al sur del país (SHOA, 1999). Las formulaciones que se utilizan para el cálculo de la marea meteorológica se pueden encontrar en Kamphuis (2000).

3.7 OBRAS COSTERAS

Los rompeolas son estructuras que reflejan, disipan, transmiten e irradian la energía incidente del oleaje en proporciones que dependen de su tipología, disposición en planta y de las características de la oscilación. Las tipologías de rompeolas se pueden describir con las siguientes partes (Gobierno de España, 2009):

- Cimentación: la cual determina la forma en que la estructura transmite los esfuerzos al suelo.
- Cuerpo central: responsable de controlar la transformación del flujo de energía del oleaje incidente y de transmitir la resultante de los esfuerzos a la cimentación. Es la parte del dique que resiste la acción del oleaje provocando su rotura, reflexión, entre otros procesos físicos.
- Superestructura: encargada de controlar el sobrepaso sobre el coronamiento.

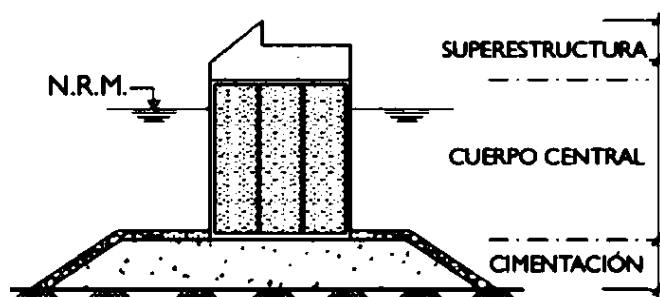


Ilustración 16: Partes de un dique de abrigo.
Fuente: (Gobierno de España, 2009).

3.7.1 ROMPEOLAS VERTICALES

Los rompeolas verticales actúan como un reflector del oleaje, y la transmisión del mismo solo se produce por rebase o en mínimas proporciones a través de la cimentación. En este tipo de estructuras el cuerpo central y superestructura están formadas por un único elemento estructural, el cual se puede construir mediante cajones prefabricados, bloques de hormigón en masa, tablestacas, etc. Es usual, en este tipo de rompeolas, coronar la superestructura con un parapeto, que a barlomar está curvado con la finalidad de facilitar el retroceso del oleaje (Gobierno de España, 2009).

En general, este tipo de rompeolas es recomendado en aquellas zonas donde sea poco probable la rotura de las olas contra el parapeto (Gobierno de España, 2009).

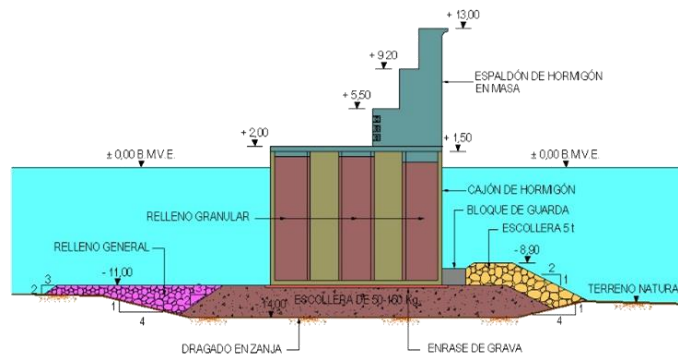


Ilustración 17: Rompeolas vertical.
Fuente: (Hernández, 2014).

Los modos de fallo de esta tipología de rompeolas son: Fallo en la estabilidad global que ocurre cuando la estructura y el terreno que la bordea pueden, juntos, fallar globalmente debido a un deslizamiento de zonas del terreno que pueden o no estar cerca de la estructura; deslizamiento, hundimiento y vuelco de la estructura (Gobierno de España, 2005). Los tipos de falla descritos se reducen a colapso, ya que no tienen, en comparación con los rompeolas en talud, fases parciales de inestabilidad antes de su colapso total. En otras palabras, debido a que esta tipología de rompeolas está constituida, casi en su totalidad, por una única pieza estructural una sola ola puede causar su fallo total (Negro *et al.*, 2002). En la Ilustración 18 a) se presentan los modos de fallo de la estructura e Ilustración 18 b) los modos de fallo de la banqueta de cimentación.

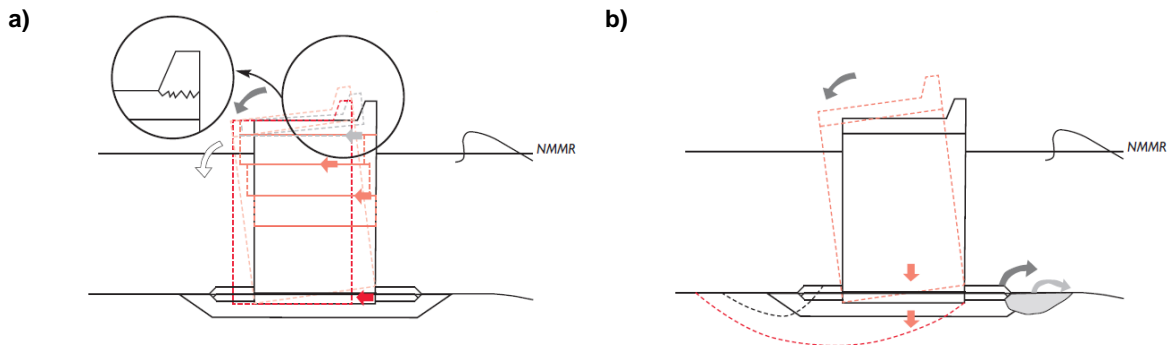


Ilustración 18: Modos de fallo de un rompeolas vertical.
Fuente: Modificado desde (Gobierno de España, 2009).

3.7.2 ROMPEOLAS EN TALUD

Los rompeolas en talud, también denominados diques de escollera pueden actuar como parcialmente reflejante o como disipativo. En este tipo de estructuras la transmisión del oleaje puede producirse por rebase en la coronación del parapeto y a través de la cimentación y del cuerpo central del rompeolas (Gobierno de España, 2009).

Los elementos que conforman los rompeolas en talud son: coraza o manto principal, que puede estar construido de piezas naturales (rocas) o artificiales (elementos prefabricados),

filtros y núcleo. Pueden contener una berma de pie, la cual asegura la estabilidad y la forma del talud y pueden o no tener parapeto (Gobierno de España, 2009).

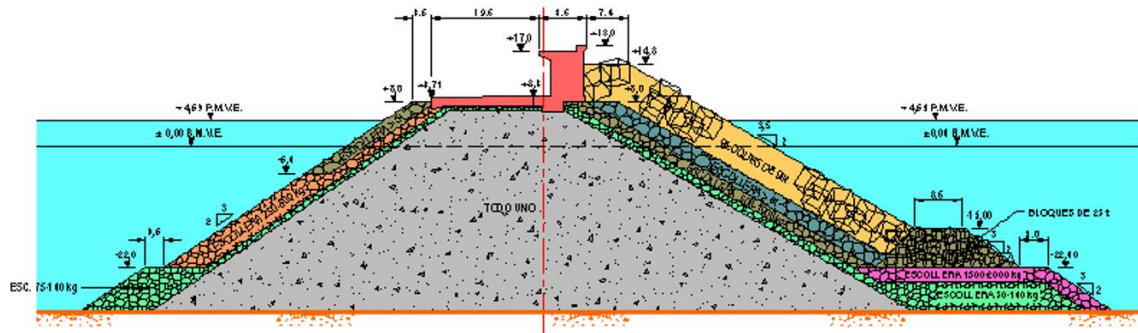


Ilustración 19: Rompeolas en talud.
Fuente: (Hernández, 2014).

Los rompeolas en talud poseen un modo de fallo gradual, es decir, los elementos que componen esta tipología de obras de abrigo (elementos de coraza, filtro y núcleo) salen uno a uno, impidiendo, de esta forma, un colapso súbito de la estructura. Algunas de las fallas que pueden presentar los rompeolas en talud son: rotura o deslizamiento de elementos de la coraza, erosión de la banqueta de cimentación, socavación de la berma y pie de talud, rotura del espaldón, entre otras (Negro *et al.*, 2002).

Tanto los rompeolas verticales como en talud pueden sufrir de sobrepaso. Las consecuencias del sobrepaso pueden ser variadas, entre ellas, peligro para personas y estructuras, erosión de la explanada y compromiso de la estabilidad de la defensa, y transmisión de oleaje en dársenas.

3.7.3 ROMPEOLAS MIXTOS

Este tipo de rompeolas puede actuar como rompeolas reflejante, disipativo o mixto, es decir, parcialmente reflejante y disipativo. Su comportamiento depende del nivel de agua y de las características del oleaje en relación con las dimensiones geométricas del dique (Gobierno de España, 2009).

Los rompeolas mixtos son aquellas estructuras en las que la cimentación del rompeolas vertical alcanza una proporción importante de la profundidad, lo cual modifica significativamente la cinemática y dinámica del oleaje (Gobierno de España, 2009).

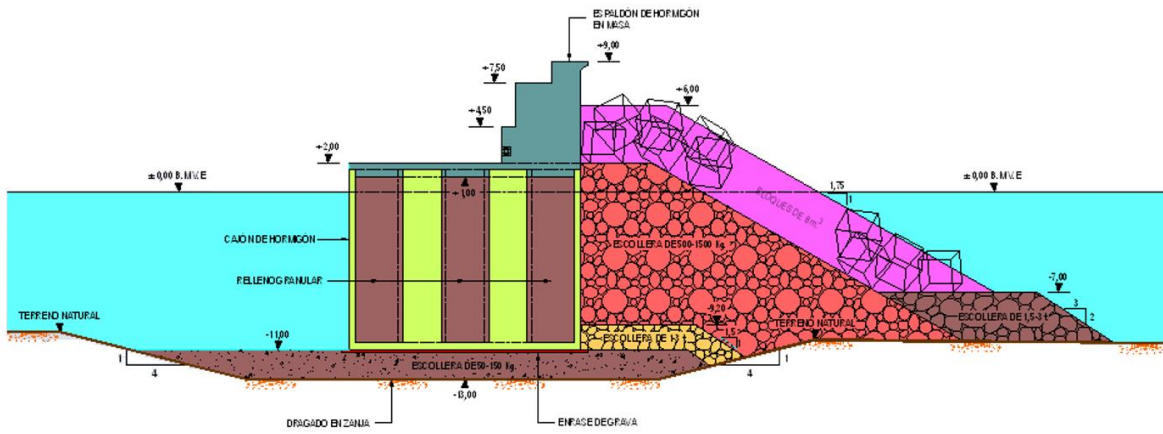


Ilustración 20: Rompeolas mixto.
Fuente: (Hernández, 2014).

4 METODOLOGÍA

El paradigma o metodología de investigación es positivista, básicamente, porque en este trabajo se examinan las variaciones de algunos parámetros climáticos y cómo estos influyen y/o interactúan en el diseño de infraestructura costera, además, los conocimientos resultantes de este trabajo están basados en observación, medición e interpretación de la realidad objetiva. Tal como indica Pérez (2008) el modelo o paradigma racionalista-cuantitativo responde a una lógica causal sustentada en el conocimiento sistemático, comprobable y comparable, medible y replicable, de la realidad.

Por otro lado, debido a que este trabajo se enfoca en el análisis y estudio de aquellas variables climáticas que tienen estrecha relación con el diseño de una obra de infraestructura, y estas son observables, susceptibles de medición y de análisis matemático, es decir, se hace un análisis de causa-efecto utilizando estadística y probando una hipótesis, el enfoque de investigación es cuantitativo. La investigación cuantitativa se puede clasificar como experimental y no experimental, la diferencia entre ambas radica en que las no experimentales son utilizadas para describir o examinar asociaciones de variables, en vez de buscar relaciones directas entre variables, como lo hace la investigación cuantitativa experimental. Por lo que desde este punto de vista el enfoque de investigación de esta memoria de proyecto de título es cuantitativo no experimental, esto se ratifica ya que en este trabajo no existen grupos de control, o manipulación de las variables utilizadas, y solo está centrado en la observación de las variables (Sousa *et al.*, 2007).

Los diseños no experimentales usualmente son clasificados como descriptivos o de correlación, esto se detalla en la Tabla 2. Debido a que la pregunta de investigación, incluida en el capítulo 1 de esta memoria de título, que sustenta este trabajo es nivel II, el diseño de investigación es correlacional predictivo. Este tipo de diseño se caracteriza por ofrecer proyecciones y cuantificar relaciones entre variables (Sousa *et al.*, 2007).

Tabla 2: Modelos de investigación cuantitativa.

Modelos	Niveles de Preguntas de la Investigación
No-experimental	
• Descriptivo	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel I – Descriptivo por naturaleza - Poco se conoce sobre el fenómeno - Preguntas descriptivas incluyendo quien, qué, cuándo, dónde, cuántos, cuánto? - Ejemplo: Cuáles son las características de X?
• Correlacionales	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel II – Exploratorio o explicativo por naturaleza - Basado en conocimiento existente - Propone relaciones - Preguntas exploratorias ou explicativas incluyen por qué y cómo? - Ejemplo: Cómo los factores...están relacionados con X?
Experimental	
• Experimental verdadero	<ul style="list-style-type: none"> • Nivel III - Predictivo por Naturaleza - Requiere conocimiento considerable previo - Prueba hipótesis o teorías predictivas - Preguntas predictivas indican la efectividad o causa y efecto de X sobre Y - Ejemplo: Existe cambios en X cuando Y es manipulado?
• Cuasi-experimental	

Fuente: (Sousa *et al.*, 2007).

Finalmente, la técnica de recolección de datos utilizada es análisis documental de fuentes secundarias, ya que para el desarrollo de este trabajo se revisaron documentos, archivos electrónicos, libros, *papers*, entre otros realizados por otros investigadores (Hernández *et al.*, 2010).

4.1 RECOLECCIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE VARIABLES

Los parámetros que son identificados y cuantificados como susceptibles a variaciones debido al fenómeno de cambio climático que son presentados en este subcapítulo tienen estrecha relación con el diseño de obras de infraestructura costera, y son representativos del sitio en estudio, Valparaíso, y específicamente Avenida Perú.

4.1.1 PROYECCIONES DE PARÁMETROS DEL OLEAJE

Los datos de proyecciones de altura significativa, dirección *peak* y periodo *peak* de oleaje son obtenidos desde la página web http://tds.csiro.au/thredds/catalog/Global_wave_projections/catalog.html, perteneciente a la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO). Estas proyecciones fueron una contribución de dicha entidad al *Coordinated Ocean Wave Climate Project*, en el cual se obtuvieron simulaciones de oleaje mediante el modelo de olas WaveWatch III (versión 3.14). Modelo que fue implementado en un dominio casi global (latitud 80°S-80°N), con una resolución espacial de 1°, una resolución direccional de 15° y se utilizó una banda de frecuencia que va desde los 0.04 a los 0.5 Hz. Como forzantes se utilizaron 10 Modelos de Circulación General (en adelante GCM, por sus siglas en inglés), los cuales son detallados en la Tabla 3, entre los que se incluyen dos simulaciones forzadas con CMIP3 y 8 simulaciones forzadas directamente con CMIP5 GCM (campos de vientos superficiales con una resolución temporal de 3 horas y concentración mensual de hielo marino, ambos, interpolados linealmente) (Hemer & Trenham, 2015).

Tabla 3: Modelos CMIP utilizados en las proyecciones de oleaje.

ID	Full model name	Model	CMIP phase	Atm Resolution Lon × Lat
1	Australian Community Climate and Earth System Simulator 1.0	ACCESS1.0	5	1.88 × 1.25
2	Beijing Climate Centre, Climate System Model, 1-1	BCC-CSM1.1	5	2.8 × 2.8
3	Centre National de Recherches Meteorologiques Coupled Global Climate Model, version 5	CNRM-CM5	5	1.4 × 1.4
4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Earth System Model 2M	GFDL-ESM2M	5	2.5 × 2.0
5	Hadley Centre Global Environmental Model 2, Earth System	HadGEM2-ES	5	1.88 × 1.25
6	Institute of Numerical Mathematics Coupled Model, version 4.0	INMCM4	5	2.0 × 1.5
7	Model for Interdisciplinary Research on Climate, version 5	MIROC5	5	1.4 × 1.4
8	Meteorological Research Institute Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model, version 3	MRI-CGCM3	5	1.1 × 1.1
9	ECMWF Hamburg climate model, version 5, dynamically downscaled using CCAM	CMIP3-CCAM-ECHAM5	3	0.5 × 0.5
10	CSIRO Mk3.5 general circulation, version 3.5, dynamically downscaled using CCAM	CMIP3-CCAM-CSIROMk3.5	3	0.5 × 0.5
11	Ensemble mean of CMIP-5 simulations (models 1-8)	CMIP5-EM	-	-
12	Ensemble mean of CMIP3-CCAM simulations (models 9-10)	CMIP3-CCAM-EM	-	-
13	Ensemble mean of all simulations (models 1-10)	EM	-	-

Fuente: (Hemer & Trenham, 2015).

Los cuatro sets de datos de proyecciones de altura significativa, dirección y periodo *peak* abarcan modelaciones climáticas a largo plazo, para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, los cuales contemplan una ventana temporal de medio siglo (2026-2045) y una de finales del siglo XXI (2081-2100) (Hemer & Trenham, 2015). Se utilizaron estos cuatro sets de proyecciones debido que son los únicos disponibles para descargar.

La habilidad de los modelos para reproducir el oleaje fue medida mediante dos métodos, la medida de *Mielke* (M-score o error cuadrático medio) y un segundo método que clasifica los modelos mediante una matriz de error normalizada. El rendimiento de los modelos y su variabilidad regional fueron definidos mediante 13 subregiones del océano global, las que pueden ser visualizadas en la Ilustración 21. Estas subregiones fueron seleccionadas de manera que el oleaje presentara características cualitativas similares dentro de cada subregión (Hemer & Trenham, 2015).

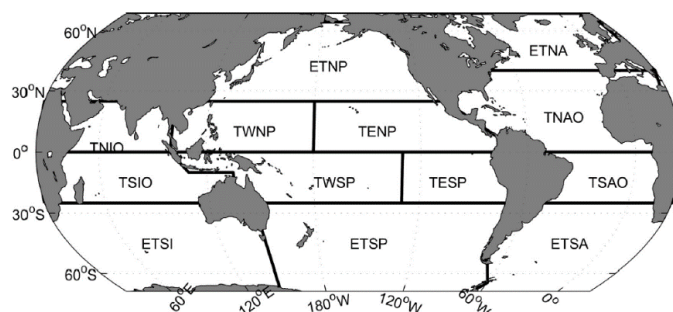


Ilustración 21: Subregiones del océano global: tropical north Indian (TNIO), tropical western North Pacific (TWNP), tropical eastern North Pacific (TENP), tropical North Atlantic (TNAO), tropical south Indian (TSIO), tropical western south Pacific (TWSP), tropical eastern south Pacific (TESP), tropical south Atlantic (TSAO), extratropical North Pacific (ETNP), extratropical North Atlantic (ETNA), extratropical south Indian (ETSI), extratropical south Pacific (ETSP) y extratropical south Atlantic (ETSA).

Fuente: (Hemer & Trenham, 2015).

Como se aprecia en la Ilustración 21, existen dos subregiones que incluyen las costas de Chile, ETSP y TESP. Para la realización de esta memoria de proyecto de título se seleccionó la subregión ETSP que contiene al área de estudio, Valparaíso.

La Tabla 4 presenta la clasificación de los GCMs de acuerdo con las matrices de error relativo, la clasificación otorga 1 a modelos que demuestran mayor habilidad para representar una subregión y 13 para modelos con menor habilidad. Debido a esto se utilizó el modelo MRI-CGCM3, ya que es el modelo con mejor desempeño en el dominio ETSP, identificándose por el análisis del error cuadrático medio como un modelo de alto rendimiento (Hemer & Trenham, 2015).

Tabla 4: Clasificación de los MCGs.

Domain	ACCESS1.0	BCC-CSM1.1	CNRM-CM5	GFDL-CM3	HadGEM2-ES	INMCM4	MIROC5	MRI-CGCM3	C3-ECHAM5	C3-Mk3.5	CMIP5-EM	CMIP3-EM	EM
TNIO	5	10	12	9	3	13	8	7	4	11	2	6	1
TSIO	10	12	13	8	9	11	7	5	2	6	4	3	1
ETSI	8	11	13	4	9	10	7	3	5	12	2	6	1
ETNP	5	9	13	7	6	11	4	3	12	8	1	10	2
TWNP	7	6	12	9	10	13	11	3	4	8	2	5	1
TENP	6	7	13	11	10	12	3	4	5	9	2	8	1
TWSP	8	12	13	7	11	9	4	1	5	10	3	6	2
TESP	4	11	13	10	6	9	3	12	5	8	2	7	1
ETSP	10	8	13	5	7	11	12	1	4	9	6	3	2
ETNA	6	13	12	10	11	9	5	8	3	7	2	4	1
TNAO	7	10	13	11	8	12	9	3	5	6	2	4	1
TSAO	8	10	13	12	4	11	9	7	6	5	2	3	1
ETSA	8	7	13	4	5	11	10	1	9	12	3	6	2
GLOB	9	12	13	8	10	11	6	1	5	7	4	3	2

Fuente: (Hemer & Trenham, 2015).

En la Ilustración 22 se presentan los nodos de extracción de los sets de proyecciones y el set de datos históricos utilizados para realizar desde la Ilustración 23 a la Ilustración 27. El nodo de extracción de los datos históricos posee una latitud de 32°59.021'S y una longitud de 77°0.682'W y el nodo de extracción de los sets de proyecciones posee una latitud de 33°1.532'S y una longitud de 72°56.794', ambos nodos poseen una condición de aguas profundas.



Ilustración 22: Nodos de extracción de sets de proyecciones y set de datos históricos.
Fuente: Elaboración propia a partir de Google earth.

Desde la Ilustración 23 a la Ilustración 27 se expone un análisis del clima de oleaje en aguas profundas, se presentan rosas de dirección *peak*, periodo *peak* y altura significativa del set de datos históricos⁵ y los cuatro sets de proyecciones climáticas, para los escenarios RCP 8.5 y RCP 4.5 de mediados y finales del siglo XXI.

⁵ Históricos corresponde al Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) desarrollado por Centers for Environmental Prediction (NCEP) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Este reanálisis posee una ventana temporal que va desde el año 1979 al 2009, con un intervalo de tiempo de 3 horas. El conjunto de datos estuvo basado en el modelo oceánico MOM4 y el sistema global de análisis de datos del

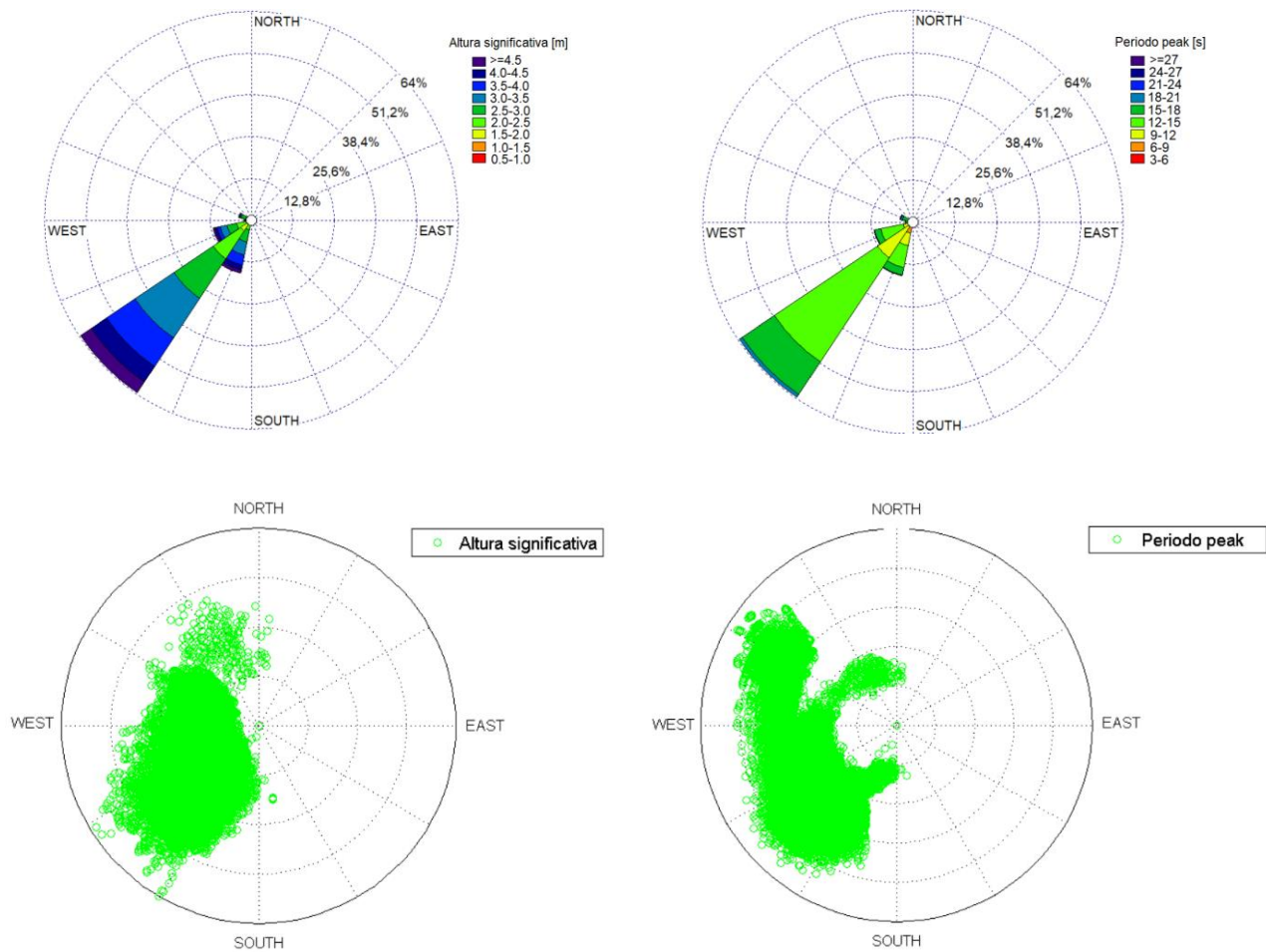


Ilustración 23: Rosas de dirección peak, periodo peak y altura significativa históricos.

océano, posee una resolución horizontal de 0.5. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/reanalysis>.

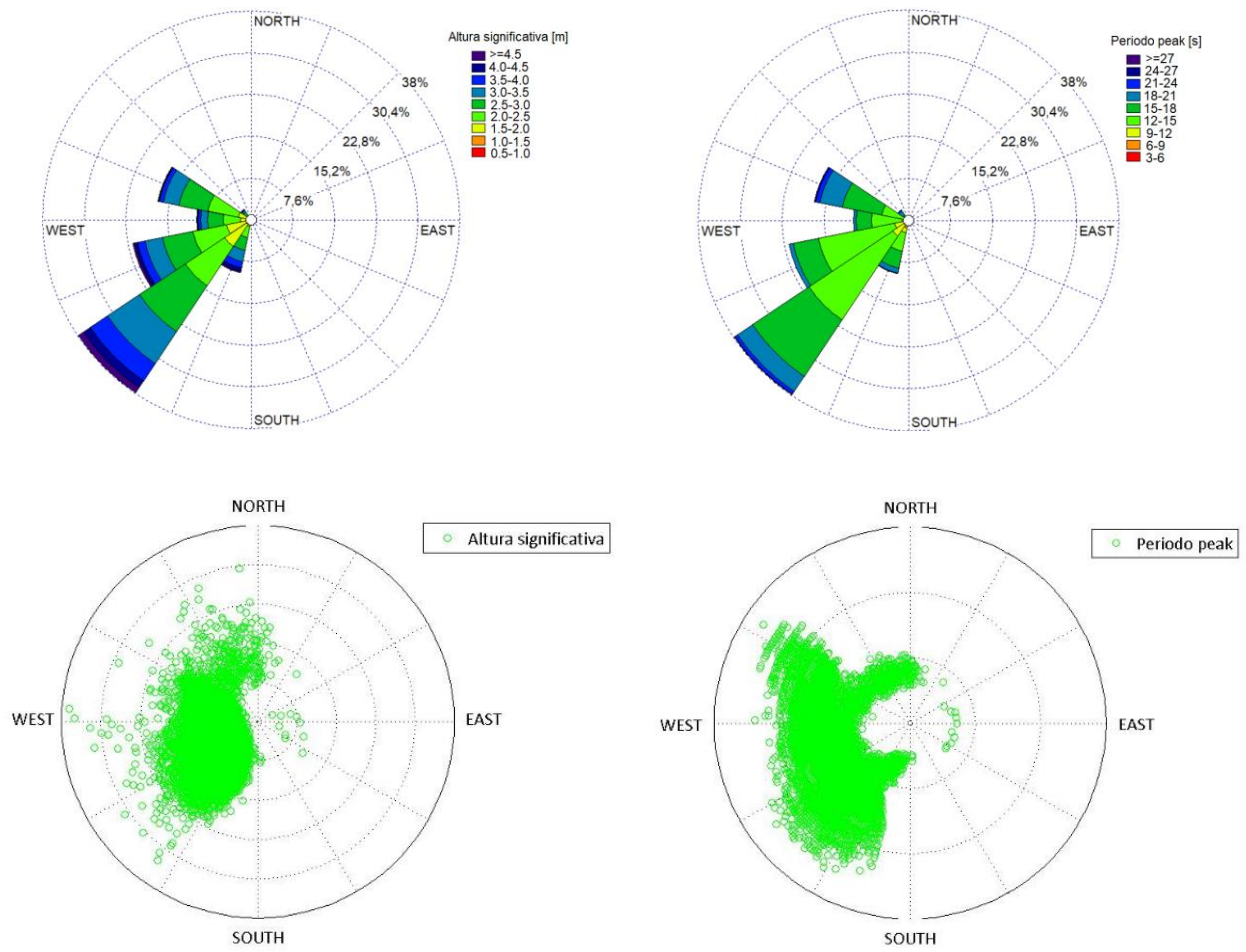


Ilustración 24: Rosas de dirección *peak*, periodo *peak* y altura significativa RCP 4.5 mediados de siglo.

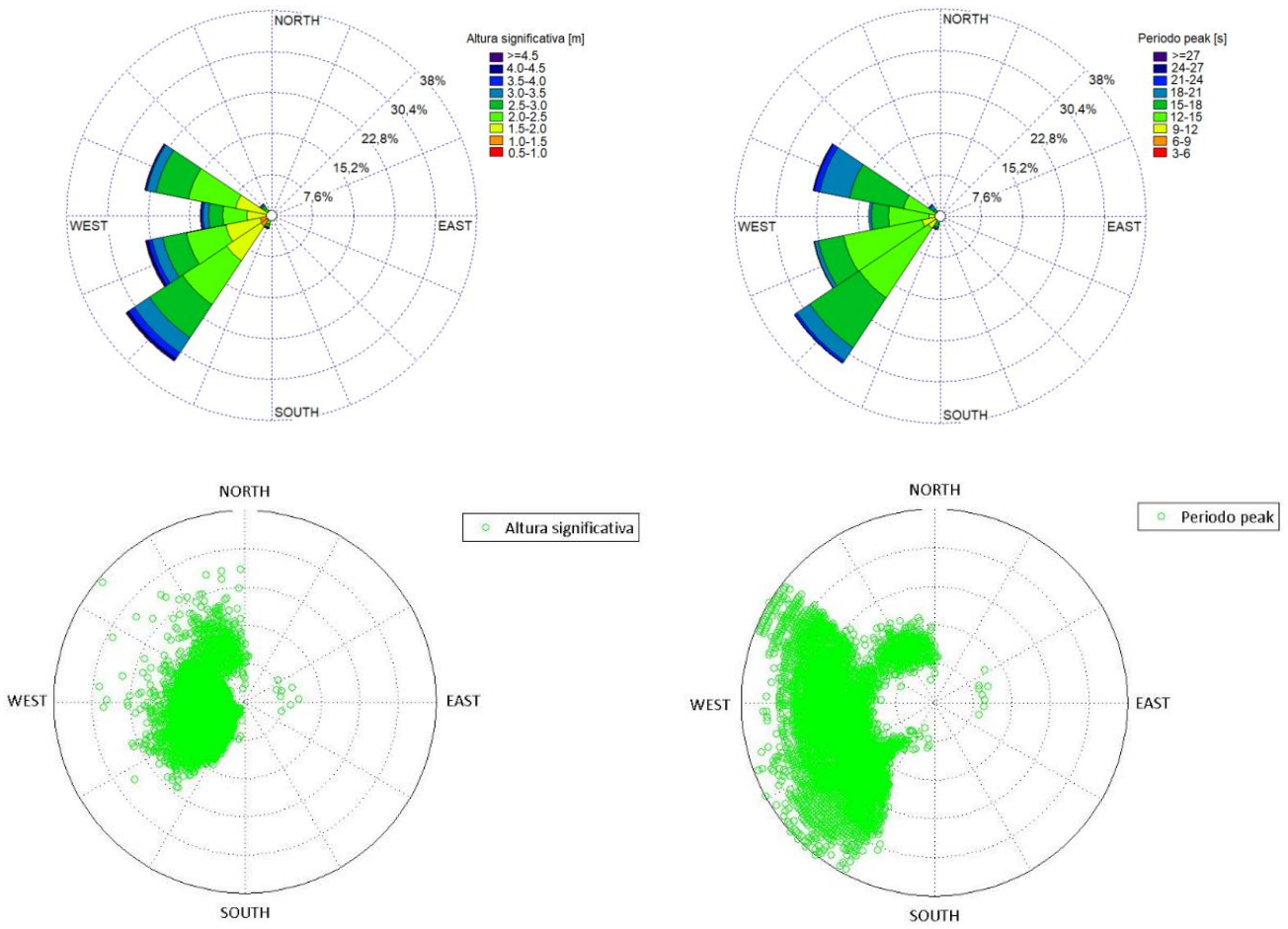


Ilustración 25: Rosas de dirección *peak*, periodo *peak* y altura significativa RCP 8.5 mediados de siglo.

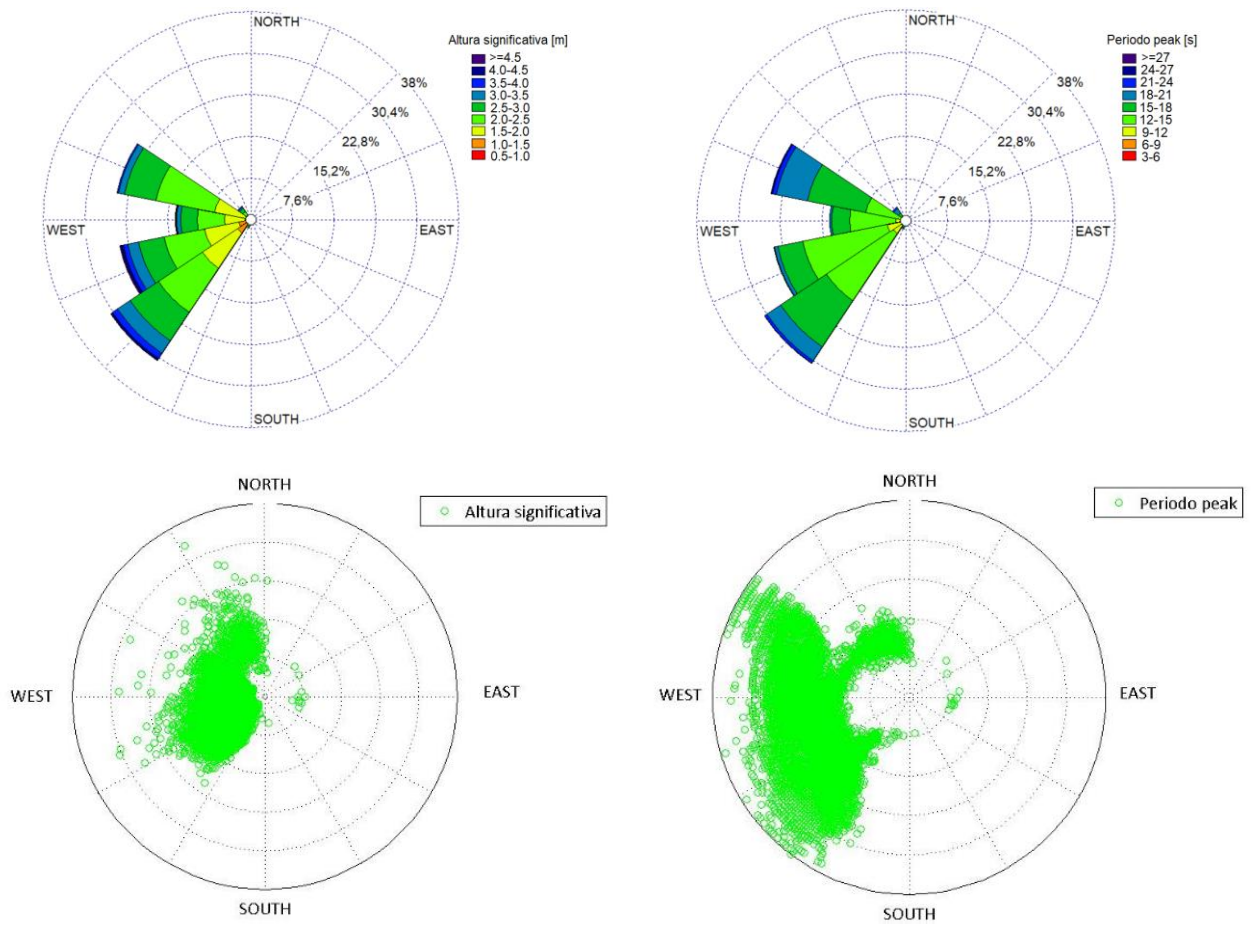


Ilustración 26: Rosas de dirección *peak*, periodo *peak* y altura significativa RCP 4.5 finales de siglo.

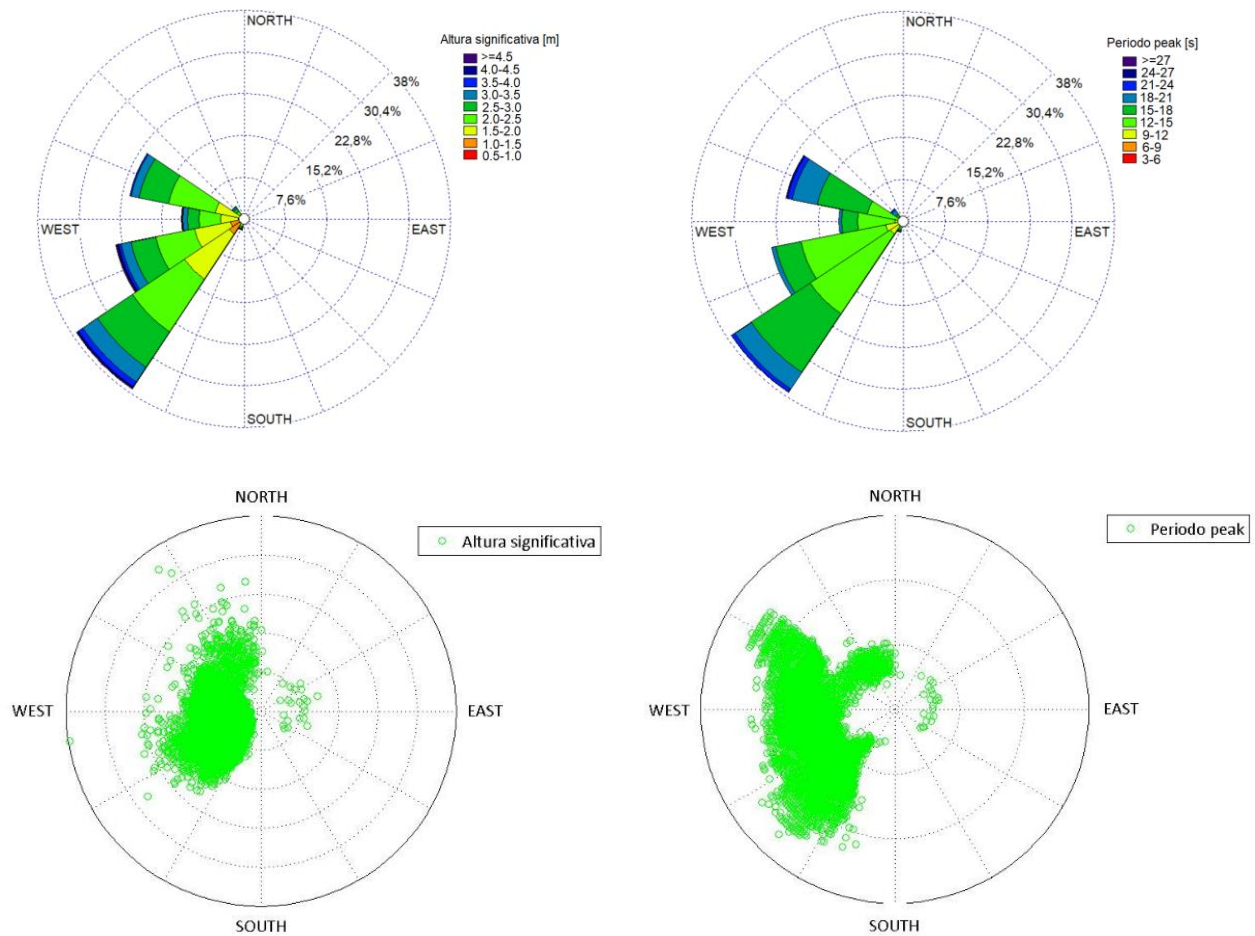


Ilustración 27: Rosas de dirección *peak*, periodo *peak* y altura significativa RCP 8.5 finales de siglo

En el set de datos históricos los mayores porcentajes de alturas significativas se encuentran en los rangos [2.5 - 3.0[y [3.0 -3.5[, con 23.54 y 21.73%, respectivamente. En cuanto a las direcciones, un 63.45% pertenece al SW y un 16.48% al SSW. Un 52.66% de los periodos se encuentra en el rango [12 - 15[[s] y un 20.16% en el rango [9 - 12] [s].

En el set de proyecciones del escenario RCP 4.5 de mediados de siglo (2026-2045) un 27.18% de las alturas significativas se encuentran en el rango [2.5 - 3.0[[m] y un 26.31% en el rango [2.0 - 2.5[[m]. En cuanto a las direcciones un 37.69% pertenece al SW y un 21.95% al WSW. Con respecto a los periodos estos se encuentran mayormente, 45.46%, en el rango [12 - 15[[s] y un 30.42% en el rango [15 - 18] [s].

En el set de proyecciones del escenario RCP 8.5 de mediados de siglo un 32.29% de las alturas significativas se encuentran en el rango [2.0 – 2.5[[m] y un 25.01% en el rango [1.5 – 2.0[[m]. Un 32.34% de las direcciones pertenecen al SW y un 23.88% al WNW. Con respecto a los periodos un 45.03% se encuentra en el rango [12 – 15[[s] y un 30.78% en el rango [15 –18] [s].

El set de proyecciones del escenario RCP 4.5 de finales de siglo (2045-2100) presenta un 34.81% de alturas significativas en el rango [2.0 – 2.5] [m] y un 24.53% en el rango [1.5 – 2.0] [m]. Un 30.8% pertenece a la dirección SW y un 24.93% al WNW. En relación a los periodos un 46.14% pertenece al rango [12 – 15] [s] y un 30.07% al rango [15 – 18] [s]. En el set de proyecciones del escenario RCP 8.5 de finales de siglo un 33.25% de las alturas significativas se encuentran en el rango [2.0 – 2.5] [m] y un 25.40% en el rango [1.5 – 2.0] [m]. Un 37.07% pertenece a la dirección SW y un 24.09% a la dirección WSW. Con respecto a los periodos, un 46.53% está en el rango [12 - 15] [s] y un 31.19% en el rango [15 – 18] [s].

Como se aprecia desde la Ilustración 23 a la Ilustración 27, el set de datos históricos presenta mayor porcentaje de datos en la dirección SW, a diferencia de los cuatro sets de proyecciones en los cuales existe una mayor dispersión en las direcciones del oleaje. En cuanto a los periodos, se exhibe una tendencia al aumento en los cuatro sets de proyecciones en relación al set de datos históricos, existiendo un mayor porcentaje de periodos de los cuatro sets de proyecciones en los rangos [12 – 15] y [15 – 18] [s], mientras que en el set de datos históricos los mayores porcentajes de periodos se encuentran en los rangos [12 – 15] y [9 – 12] [s]. Las alturas significativas no presentan variaciones debido al fenómeno de cambio climático, encontrando mayores porcentajes de las alturas del set de datos históricos en los rangos [2.5 - 3.0] y [3.0 - 3.5], mientras que en los cuatro sets de proyecciones los rangos que presentan mayores porcentajes de las alturas significativas son [2.0 - 2.5] y [1.5 - 2.0]. En resumen, el parámetro de la altura significativa exhibe una tendencia a la disminución debido al fenómeno de cambio climático, en aguas profundas. En este punto es importante recalcar, que, si bien no existe un aumento en la altura significativa de aguas profundas debido al cambio climático, si se aprecia una mayor dispersión en las direcciones, presentándose olas desde la dirección Oeste y Noroeste, lo que podría conllevar a mayores alturas significativas a nivel costero, y sumado a esto mayores daños en la infraestructura presente en el sitio de estudio, Valparaíso, ya que es una bahía orientada al Norte.

Los datos presentados en las rosas de oleaje de este subcapítulo corresponden a aguas profundas.

4.1.2 BATIMETRÍA

4.1.2.1 Cartas náuticas

Las grillas batimétricas utilizadas para efectuar las propagaciones de oleaje se realizaron con la información presente en las Cartas Náuticas Electrónicas (en adelante CNE) del SHOA correspondientes al año 2006. Las cartas utilizadas se presentan en la Ilustración 28 y corresponden a a) la número 4000 “Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso”, b) la número 4320 “Bahía Quintero a Bahía Valparaíso”, c) la número 5000 “Bahía Valparaíso a Golfo de Arauco” y d) la numero 5111 “Bahía y Puerto Valparaíso”. Las escalas son 1:500000, 1:500000, 1:500000 y 1:10000, respectivamente.

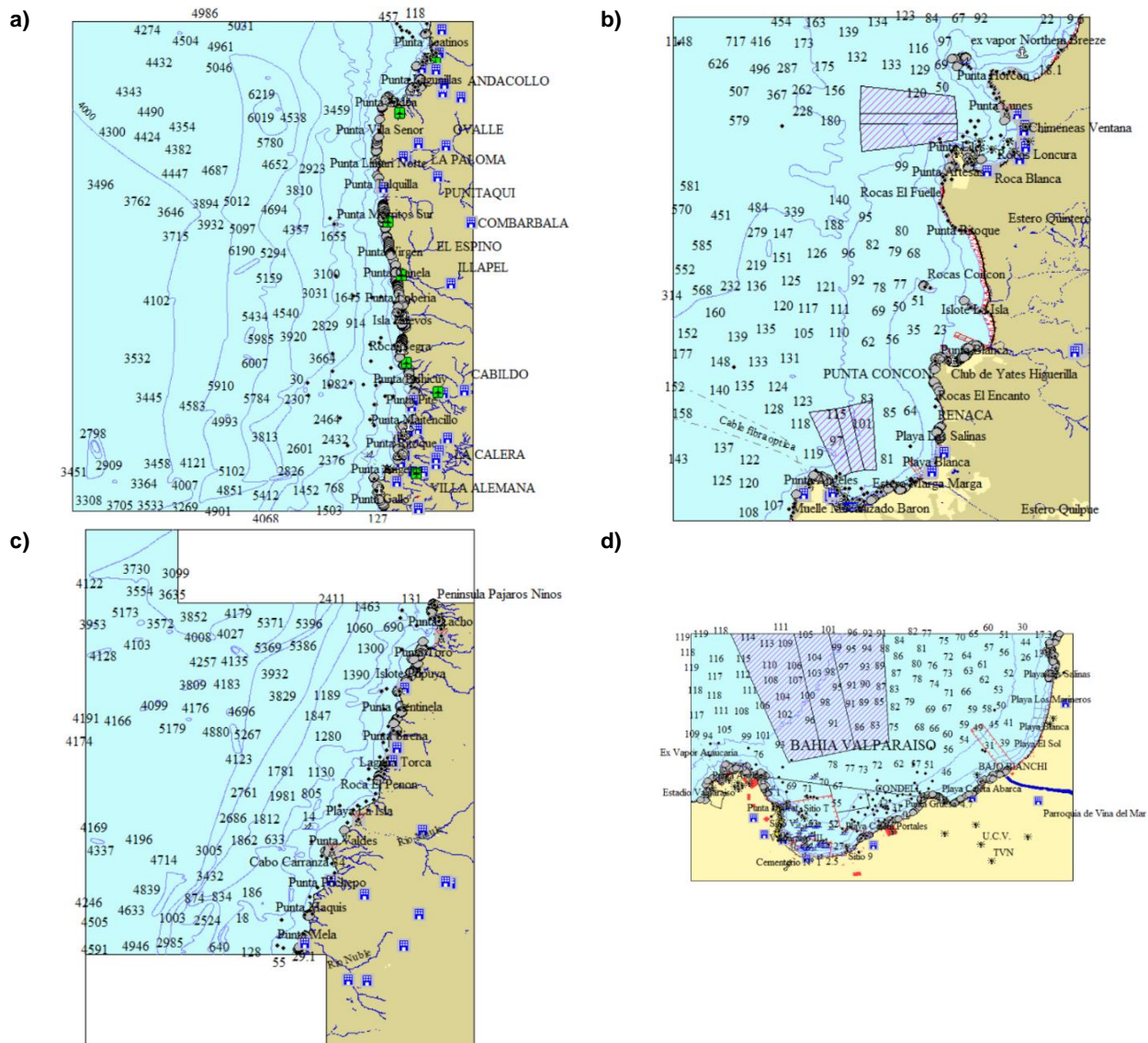


Ilustración 28: Cartas Náuticas Electrónicas.
Fuente: SHOA.

4.1.2.2 Generación de grillas

Mediante el software Global Mapper versión 15.2 se obtuvieron los sondajes, línea de costa y batimetría de las cartas náuticas presentadas en la Ilustración 28. La información de las cuatro cartas náuticas se reúne en un archivo batimétrico que abarca desde la Bahía de Coquimbo hasta el Golfo de Arauco.

La condición de aguas profundas en el límite oeste de la grilla de menor resolución se calculó seleccionando los periodos de oleaje proyectados para el rango de años 2026-2045 y 2081-2100, rango que comprende desde los 3 a los 28 segundos. Con ese rango de

periodos y una profundidad de 1000 metros se verifica la condición de aguas profundas en el límite oeste de la grilla.

Para la generación del modelo de elevación digital se utilizó un *script*⁶ en MATLAB y los datos de sondaje, línea de costa y batimetría de las cartas náuticas. Los límites de dicho modelo son:

Límite inferior: Coordenada Este 150000 [m], coordenada Norte 6250000 [m].

Límite superior: Coordenada Este 300000 [m], coordenada Norte 6500000 [m].

En la Ilustración 29 a) se presentan los sondajes de la grilla de menor resolución, generada a partir de las cartas náuticas e Ilustración 29 b) presenta el modelo de elevación digital.

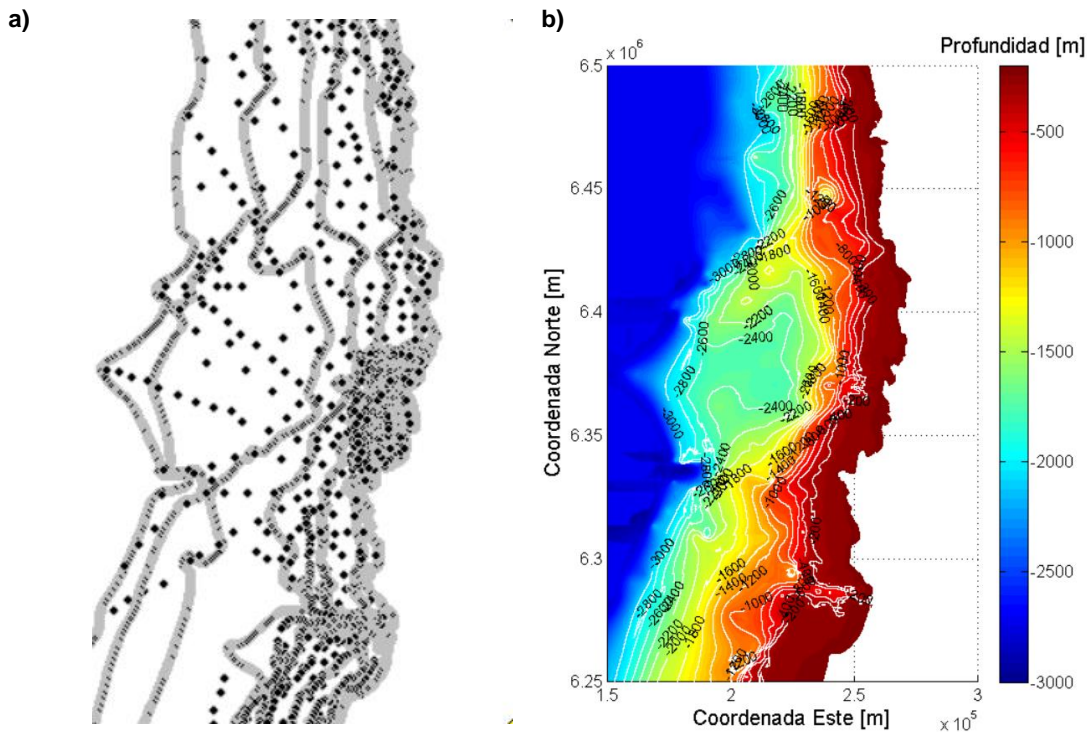


Ilustración 29: a) Sondajes grilla menor resolución y b) modelo de elevación digital.

⁶ El script utilizado para la realización de la malla batimétrica se basa en el comando de MATLAB denominado *TriscatteredInterp*, el cual utiliza la triangulación de Delauney.

4.1.3 PROPAGACIÓN DE OLAJE

La propagación de oleaje espectral se realiza mediante el software SWAN y la metodología de propagación de alturas unitarias. Se utilizan además dos anidados, con la finalidad de mejorar en forma progresiva la resolución de las grillas en el sector de estudio. La Ilustración 30 a) presenta la grilla de menor resolución, de 200x200 [m], Ilustración 30 b) expone el primer anidado con una resolución de 100x100 [m] e Ilustración 30 c) el segundo anidado con una resolución de 25x25 [m]. Los límites de ambos anidados son:

Primer anidado:

Límite inferior: Coordenada Este 227600 [m], coordenada Norte 6333200 [m].

Límite superior: Coordenada Este 265600 [m], coordenada Norte 6366400 [m].

Segundo anidado:

Límite inferior: Coordenada Este 249400[m], coordenada Norte 6339800[m].

Límite superior: Coordenada Este 262200 [m], coordenada Norte 6350200 [m].

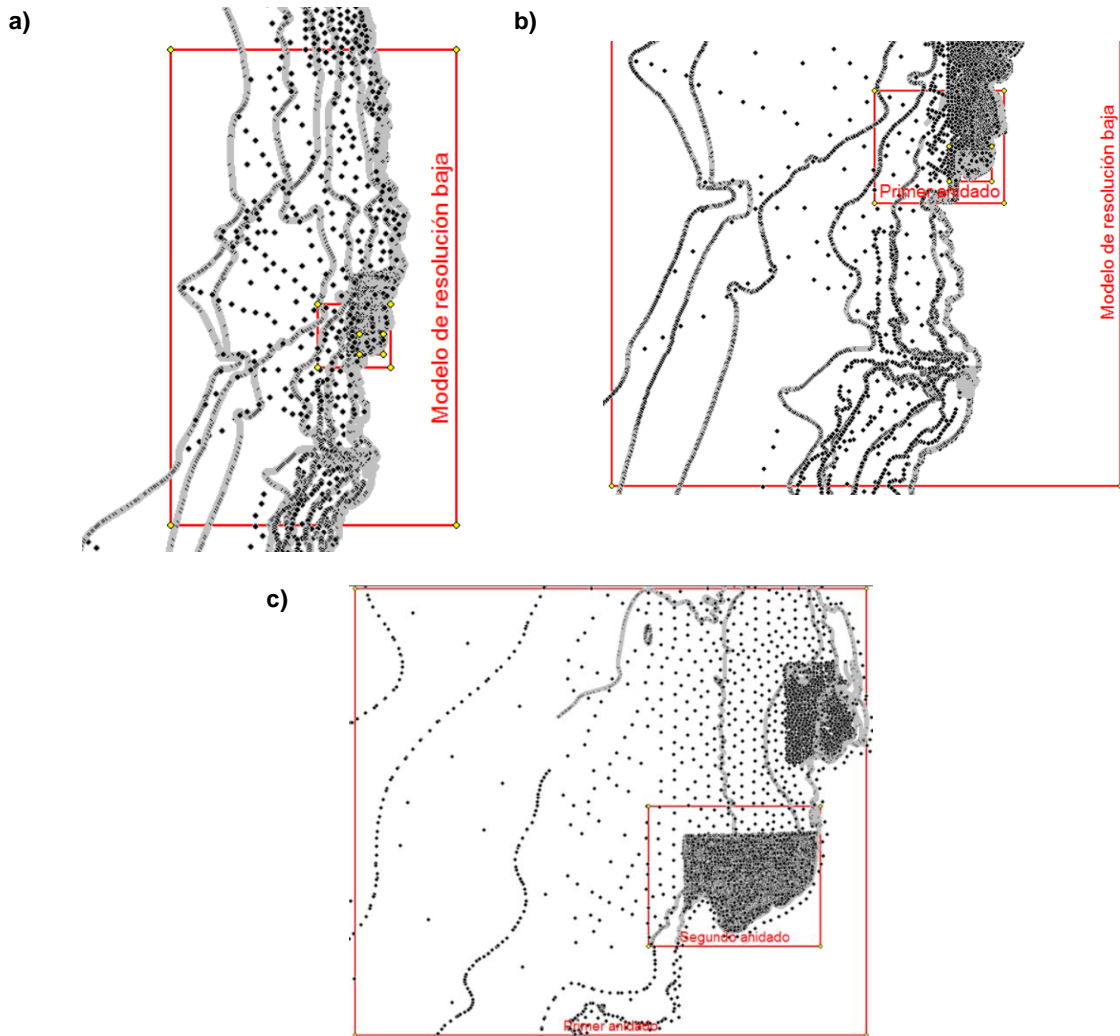


Ilustración 30: Grillas de cálculo.

Las condiciones de borde del modelo de propagación son un espectro tipo *Jonswap* caracterizado por su periodo *peak* y modulado por una altura de ola unitaria. Se utiliza un coeficiente de dispersión direccional de 20° y se impone un índice de rotura constante en aguas someras de 0.78, con un coeficiente de disipación (*alpha*) de 1.0 y una resolución direccional de 2°. La resolución en el espacio de frecuencias es calculada mediante la ecuación (2) presentada en Delft University of Technology (s.f.) y corresponde a 23, ya que la frecuencia mínima es 0.036 y la frecuencia máxima es 0.336.

(2)

$$\frac{\Delta f}{f} = \left(-1 + \left(\frac{\text{Frec. mínima}}{\text{Frec. máxima}} \right)^{1/[\text{msc}]} \right)$$

La Ilustración 31 a) muestra una figura de ubicación con una escala 1:7000 e Ilustración 31 b) presenta los nodos de evaluación con una escala 1:697. Los nodos 2, 3 y 4 poseen una profundidad aproximada de 10 [m] y los nodos 4, 5 y 6 una profundidad aproximada de 20 [m]. Las coordenadas de los nodos de control son (en coordenadas Universal Transverse Mercator, UTM):

Nodo 1: E: 260198 N: 6343874
 Nodo 2: E: 260711 N: 6344154
 Nodo 3: E: 261087 N: 6344530
 Nodo 4: E: 259916 N: 6343888
 Nodo 5: E: 260504 N: 6344256
 Nodo 6: E: 261023 N: 6344619

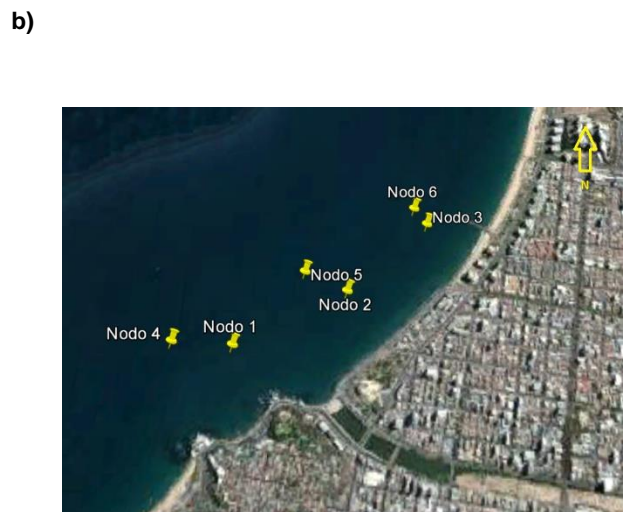


Ilustración 31: Posición de los nodos de control.
Fuente: Elaboración propia a partir de Google earth.

Los rangos de periodos propagados cubren entre 3 y 30 [s], con un intervalo de 3 [s]. Las direcciones propagadas son: N, NNW, NW, S, SSW, SW, W, WNW, WSW. En la Ilustración

32 e Ilustración 33 se presentan los resultados de los modelos de propagación correspondientes a los periodos 13 y 16 [s] y direcciones W y NW, respectivamente. En ambas ilustraciones a) corresponde al modelo de propagación de menor resolución, b) al primer anidado y c) al segundo anidado.

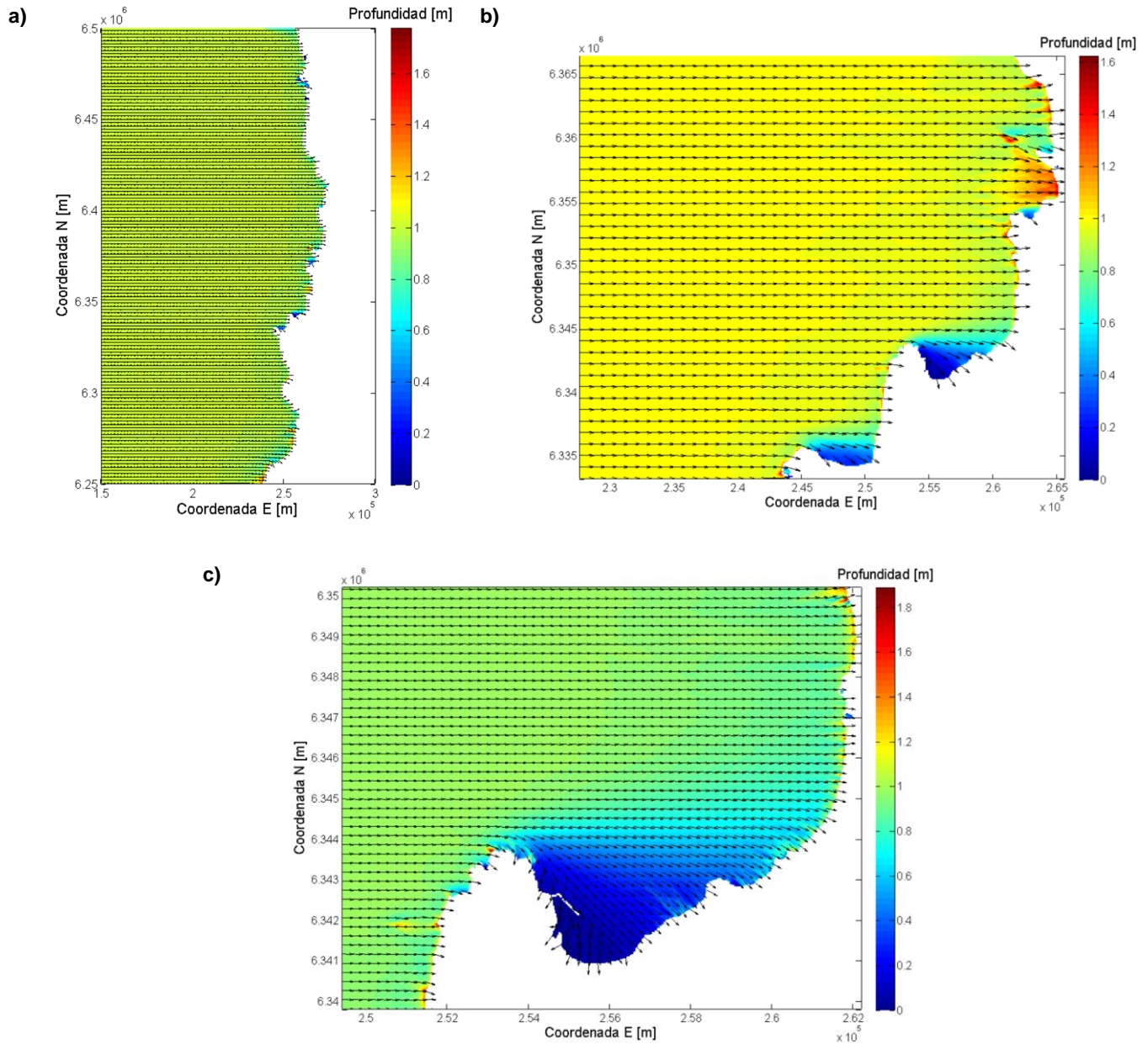


Ilustración 32: Propagación altura unitaria, periodo 13 [s] y dirección W.

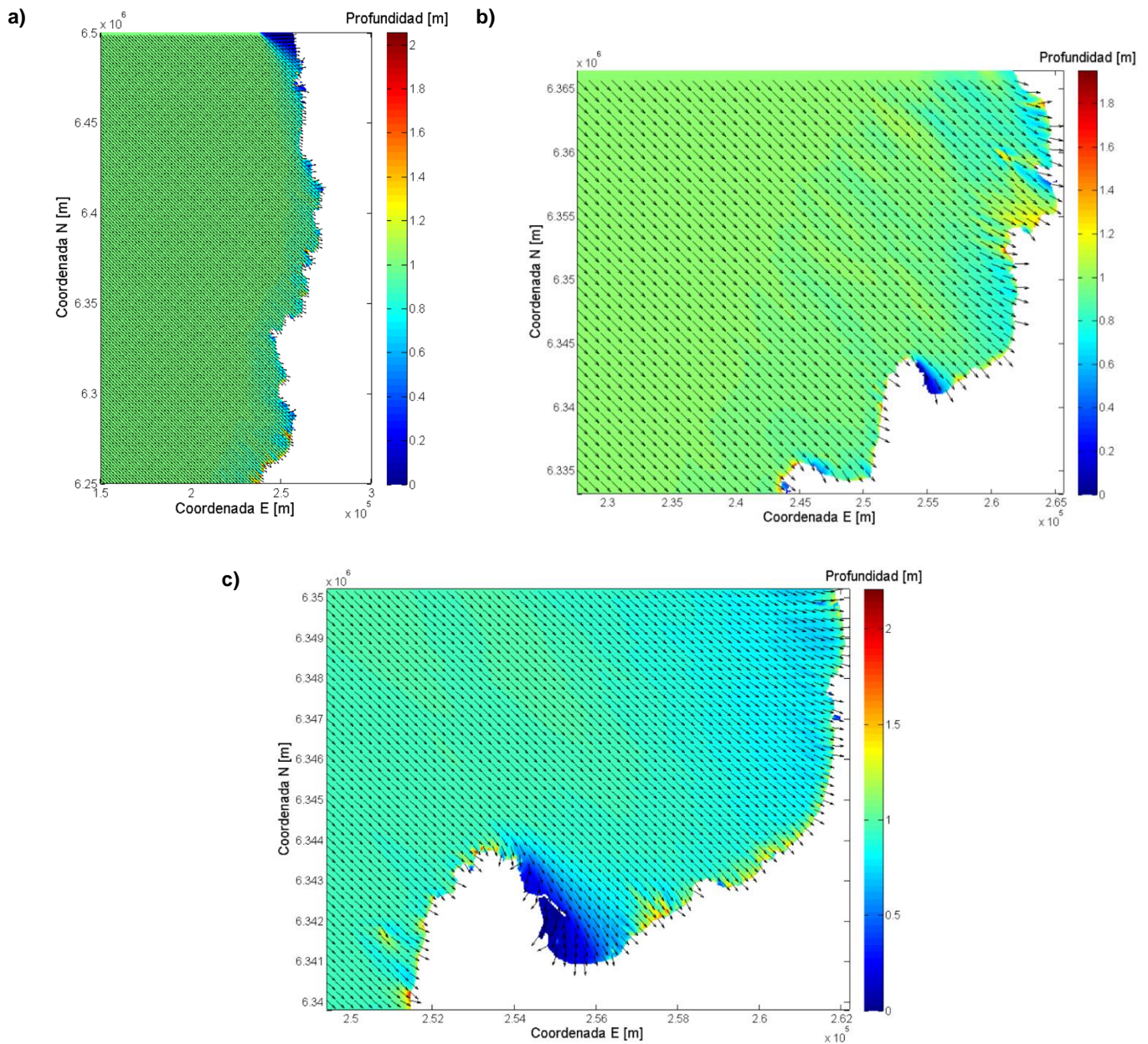


Ilustración 33: Propagación altura unitaria, periodo 16 [s] y dirección NW.

Desde la Ilustración 34 a la Ilustración 37 se presentan los resultados de las propagaciones de direcciones y coeficientes de agitación (K_a) para el nodo 2 (profundidad 10 [m]) y nodo 5 (profundidad 20 [m]), los cuales pueden ser observados en la Ilustración 31.

En la Ilustración 34 e Ilustración 35 se observa que a medida que el oleaje se acerca a la costa experimenta una concentración en sus direcciones hacia el NW. En cuanto a la Ilustración 36 e Ilustración 37 no existe un patrón definido. Se identifica que oleaje con periodos de entre 3 y 14 [s] sufre una disminución en su altura a medida que se acerca a la costa y aquel oleaje con periodos entre 15 y 30 [s] sufre un aumento en su altura.

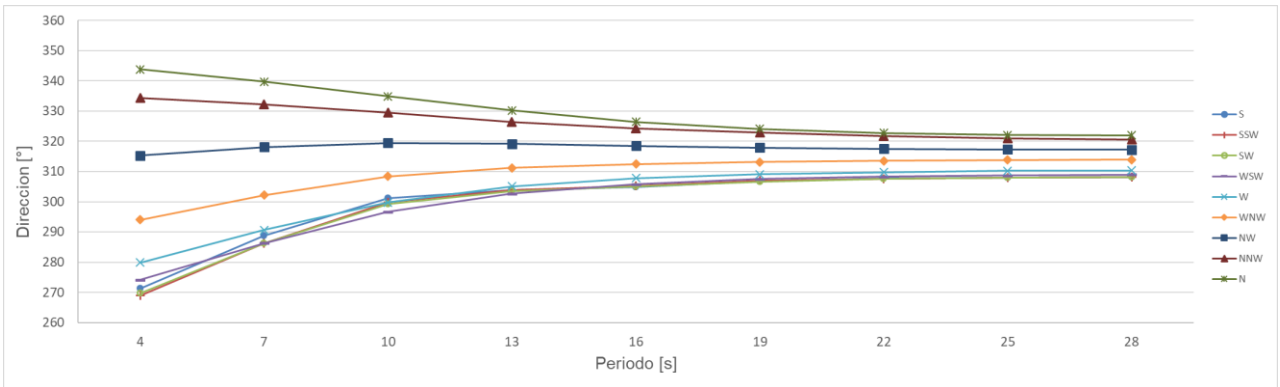


Ilustración 34: Dirección del oleaje, profundidad 10 [m].

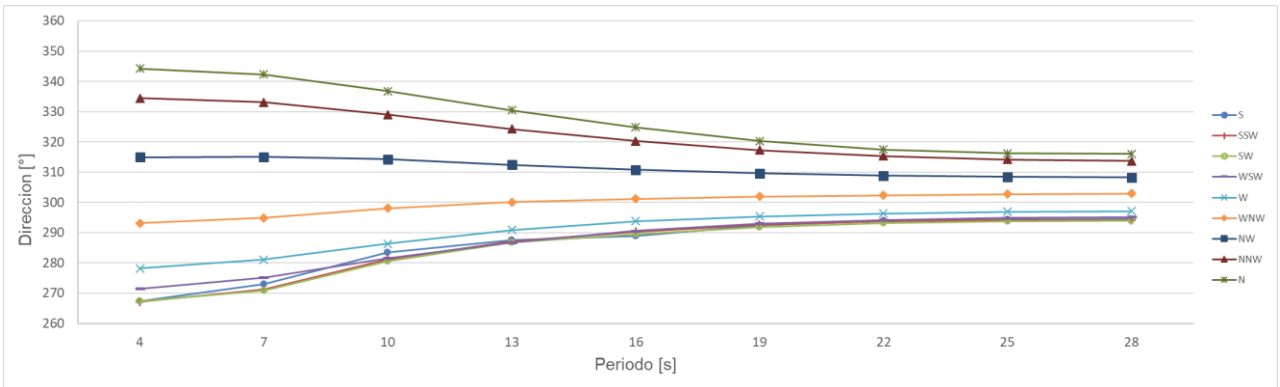


Ilustración 35: Dirección del oleaje, profundidad 20 [m].

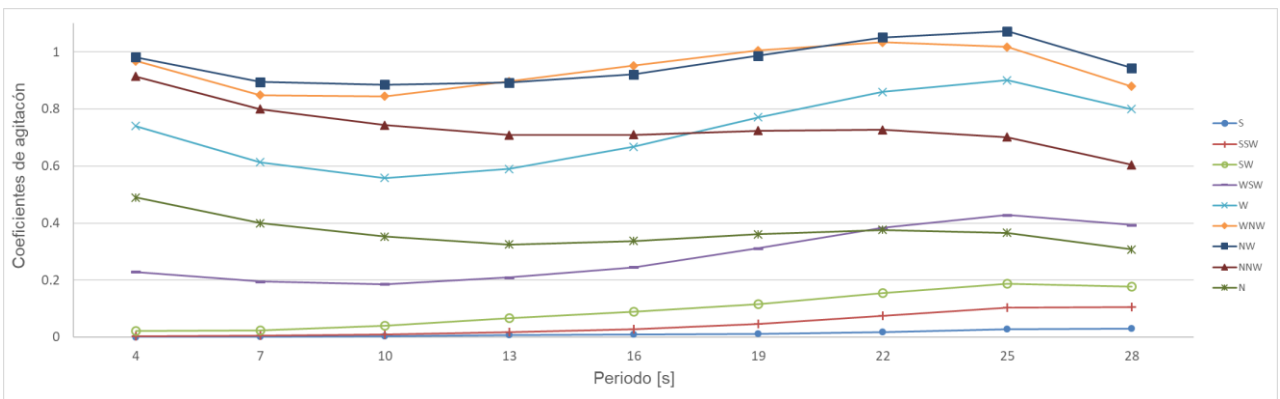


Ilustración 36: Coeficientes de agitación, profundidad 10 [m].

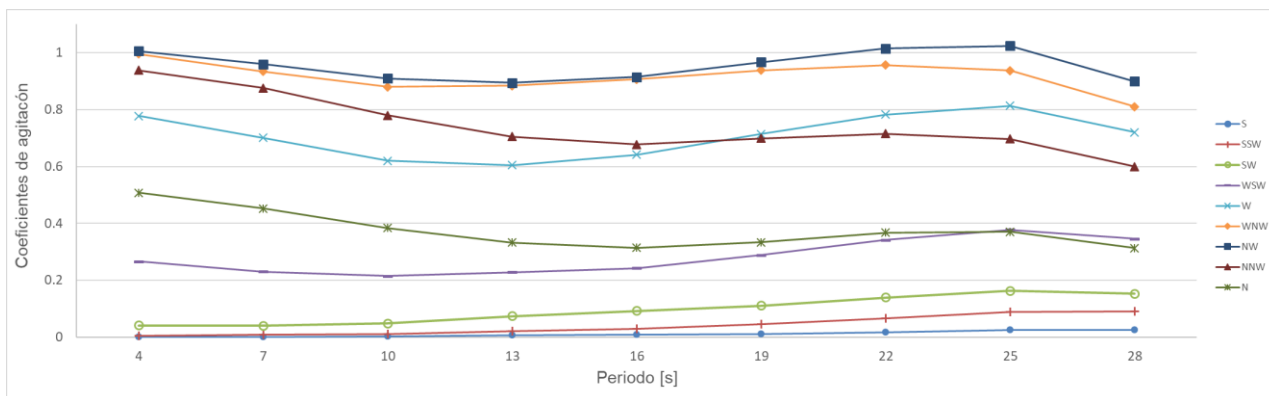


Ilustración 37: Coeficientes de agitación, profundidad 20 [m].

4.1.4 CLIMA EXTREMO

El análisis de valores extremos se realizó mediante el método POT, ya que posee la ventaja, en comparación con la metodología de máximos anuales, de no perder valores extremos dentro de un mismo año que podrían resultar más energéticos que los valores máximos de otros años. Siguiendo las Instrucciones Oceanográficas del SHOA se consideró una data de 20 años de oleaje en aguas profundas. Se identificaron y aislaron al menos 20 tormentas para cada una de las datas analizadas y se realizó un análisis estadístico con estimación de la altura significativa con periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. El análisis de clima extremo se llevó a cabo en aguas profundas siguiendo las instrucciones expuestas en SHOA (2005).

Para el análisis de valores extremos se probaron las distribuciones de probabilidad para valores extremos, de Gumbel y Weibull, escogiéndose la de mejor correlación (Goda, 1988). Se seleccionó un umbral de 5 metros, obteniéndose 39 tormentas para el set de datos de proyecciones del escenario RCP 4.5 de mediados de siglo (años 2026-2045), 38 tormentas para el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo, 43 tormentas para el escenario RCP 4.5 de finales de siglo (años 2081-2100) y 33 tormentas para el escenario RCP 8.5 de finales de siglo. Todos los eventos seleccionados poseen una independencia de al menos 5 días entre ellos y son presentados en el capítulo de anexos.

Los resultados del análisis de clima extremo cumplen con dos de las tres condiciones propuestas por Liu y Frigaard (2001), estas son: independencia y homogeneidad. La independencia tiene relación con la nula correlación entre los datos extremos, es decir, que los valores extremos provengan de diferentes tormentas. En cuanto a la homogeneidad, esta se refiere a la pertenencia de los valores extremos a una misma población estadística. La tercera condición propuesta por Liu y Frigaard (2001) estacionalidad⁷, no es cumplida en los valores extremos, ya que como se muestra en la Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7 la desviación estándar y el promedio se ven afectados por el paso del tiempo.

⁷ La estacionalidad tiene relación con que el comportamiento estadístico del proceso no se vea afectado por el paso del tiempo.

Tabla 5: Promedio y desviación estándar de datos históricos y proyecciones de la altura significativa de oleaje.

	Históricos	Rcp 4.5 mediados de siglo	Rcp 8.5 mediados de siglo	RCP 4.5 finales de siglo	RCP 8.5 finales de siglo
Promedio	3.03	2.64	2.29	2.25	2.24
Desviación Estándar	0.84	0.76	0.66	0.64	0.63

8

Tabla 6: Promedio y desviación estándar de los datos históricos y proyecciones del periodo *peak* del oleaje.

	Históricos	Rcp 4.5 mediados de siglo	Rcp 8.5 mediados de siglo	RCP 4.5 finales de siglo	RCP 8.5 finales de siglo
Promedio	13.36	14.82	14.91	14.88	14.96
Desviación Estándar	2.35	2.82	2.78	2.75	2.70

Tabla 7: Promedio y desviación estándar de los datos históricos y proyecciones de la dirección *peak* del oleaje.

	Históricos	Rcp 4.5 mediados de siglo	Rcp 8.5 mediados de siglo	RCP 4.5 finales de siglo	RCP 8.5 finales de siglo
Promedio	228.86	246.90	256.30	257.72	253.35
Desviación Estándar	21.48	32.04	31.23	31.07	30.66

En la Tabla 5 se observa que los promedios de las alturas significativas en los cuatro escenarios RCP presentan una disminución en comparación con el promedio histórico, sin embargo en la Tabla 6 y Tabla 7 se presenta un aumento en los promedios de los periodos y direcciones del oleaje, en aguas profundas, para los cuatro escenarios RCP. Esto implica que el cambio climático induce un oleaje que incide de forma más directa en la zona de estudio, ya que Valparaíso es una bahía orientada hacia el norte, estando protegida del oleaje del Sur, pero expuesta al oleaje del Norte.

En la Ilustración 38 se presentan los resultados del análisis de clima extremo, con un intervalo de confianza del 90%, para los cuatro escenarios RCP. Se incluye el análisis de clima extremo de los valores históricos con la finalidad de tener una noción de cuanto afectará el cambio climático en las alturas significativas de eventos extremos. El detalle de las alturas significativas resultantes del análisis de clima extremo, junto con la distribución de mejor correlación y el parámetro de forma (k) de la distribución, son presentados en la Tabla 8. En la Tabla 9 se muestran los periodos correspondientes a las alturas significativas del análisis de clima extremo, periodos que son calculados mediante la ecuación (1) presentada en esta memoria de título.

⁸ Históricos corresponde al mismo set de datos presentados en la Ilustración 23.

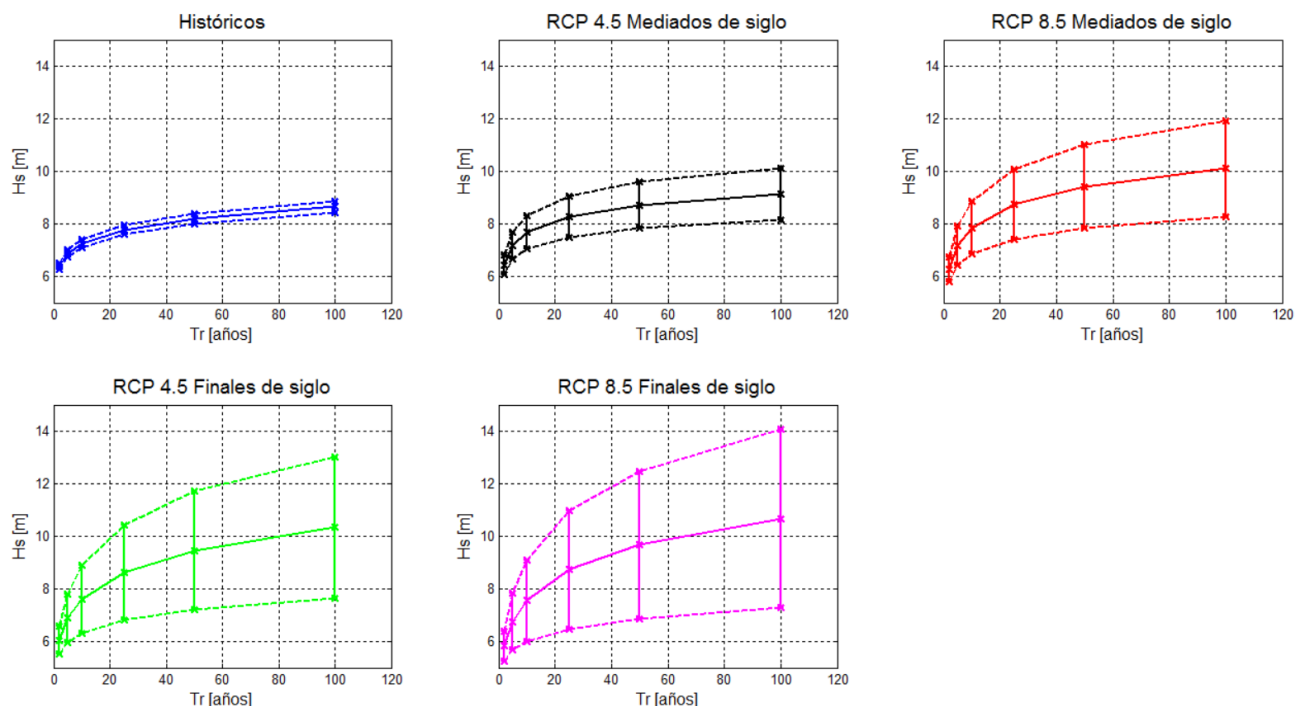


Ilustración 38: Altura significativa de eventos extremos.

Tabla 8: Altura significativa de eventos extremos.

Escenario	Distribución	Coeficiente	R ²	Periodo de retorno [años]					
				2	5	10	25	50	100
RCP 4.5 mediados de siglo	Weibull	K= 1.4	0.98	Alturas significativas de eventos extremos [m]					
RCP 8.5 mediados de siglo	Weibull	K= 1	0.98	6.45	7.18	7.67	8.28	8.71	9.13
RCP 4.5 final de siglo	Weibull	K= 0.75	0.98	6.28	7.17	7.85	8.75	9.43	10.11
RCP 8.5 final de siglo	Weibull	K= 0.75	0.95	6.06	6.89	7.61	8.63	9.47	10.34
				5.84	6.76	7.57	8.73	9.68	10.68

Tabla 9: Periodo de olas de eventos extremos.

Escenario	Periodo de retorno [años]					
	2	5	10	25	50	100
	Periodo de alturas significativas de eventos extremos [s]					
RCP 4.5 mediados de siglo	11.94	12.77	13.32	13.98	14.43	14.86
RCP 8.5 mediados de siglo	11.74	12.77	13.52	14.47	15.17	15.85
RCP 4.5 final de siglo	11.48	12.45	13.25	14.35	15.21	16.08
RCP 8.5 final de siglo	11.21	12.30	13.20	14.45	15.42	16.41

Se debe tener presente que al calcular los periodos de las alturas significativas de eventos extremos mediante la ecuación (1), se está asignando una relación entre la altura significativa y su periodo, relación que en las costas del país no se presenta, debido principalmente a la multimodalidad que exhibe el oleaje (Beyá *et al.*, 2016). La Ilustración 39 expone lo detallado anteriormente presentando la nula correlación entre las alturas significativas de las tormentas seleccionadas para la realización del análisis de clima extremo y su periodo calculado mediante la ecuación (1). Los datos utilizados para la realización de esta ilustración corresponden al set de datos de proyecciones del escenario RCP 4.5 de finales de siglo.

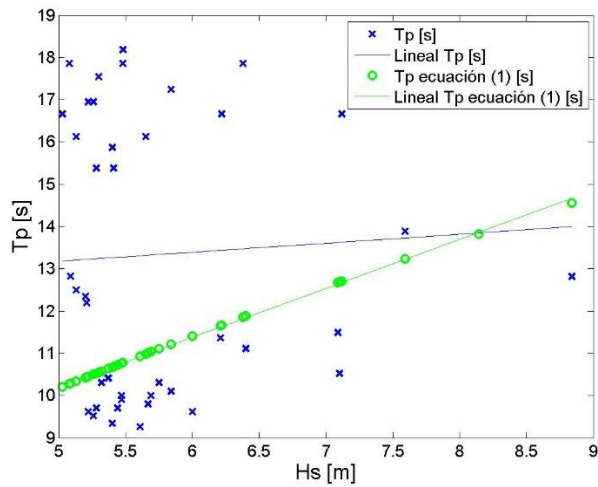


Ilustración 39: Periodos de alturas significativas de eventos extremos.

En cuanto a las direcciones de los eventos extremos, estas se consideran como las que engloba la línea de tendencia de mejor ajuste que se impuso en cada una de las datas que contienen la selección de tormentas para la realización del análisis de clima extremo. En la Ilustración 40 se presentan las direcciones correspondientes a las tormentas seleccionadas para la realización del análisis de clima extremo, las cuales pertenecen al escenario RCP 4.5 de finales de siglo. Como se aprecia en la ilustración las direcciones que abarca la línea de tendencia de mejor ajuste son: WNW y NW.

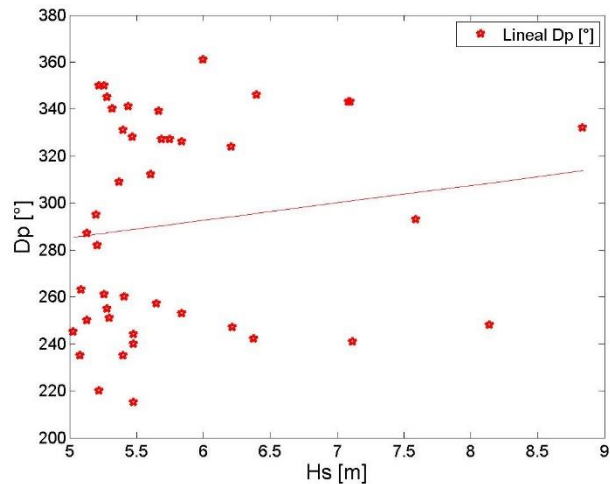


Ilustración 40: Dirección de alturas significativas de eventos extremos.

4.1.5 CLIMA MEDIO

El análisis de clima medio se lleva a cabo siguiendo las Instrucciones Oceanográficas N°1 (SHOA, 2005). Desde la Ilustración 41 a la Ilustración 45 se presentan rosas de los parámetros medios mensuales del oleaje para los cuatro sets de proyecciones de los escenarios RCP propagados hasta los 10 [m]. Se incluye el set de datos históricos.

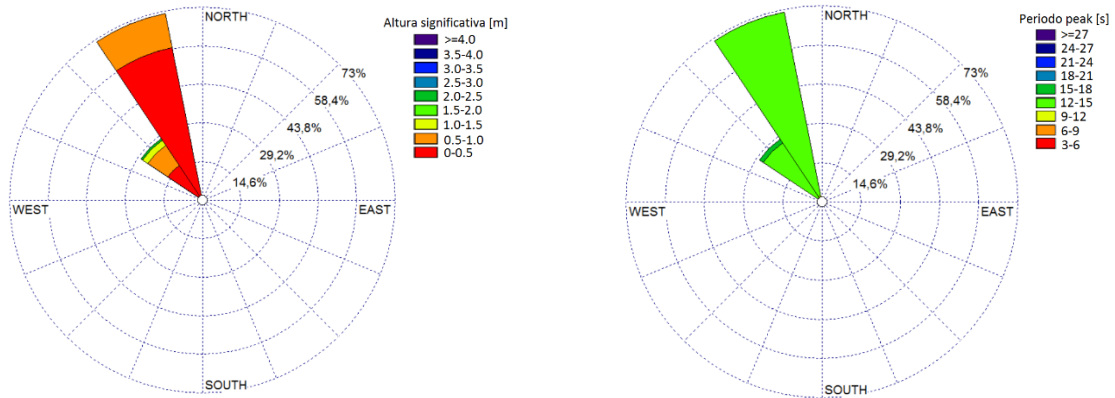


Ilustración 41: Rosas de parámetros del oleaje set de datos históricos.

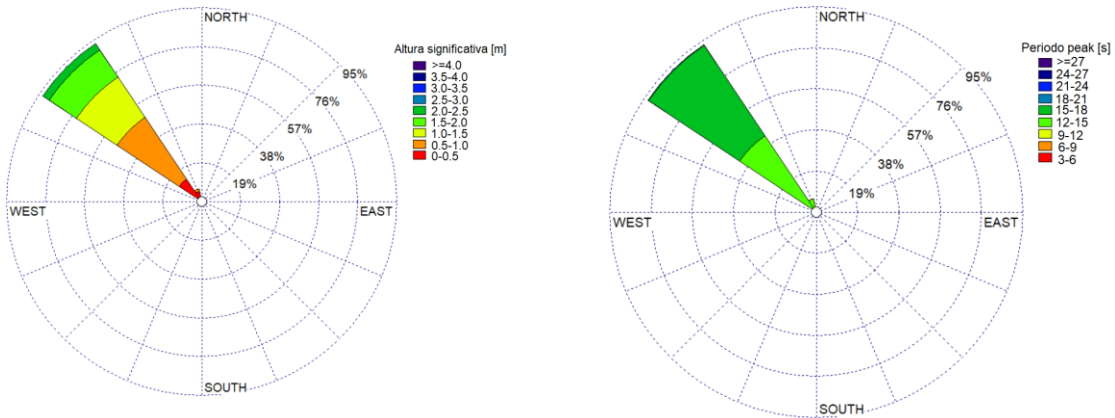


Ilustración 42: Rosas de parámetros del oleaje RCP 4.5 mediados de siglo.

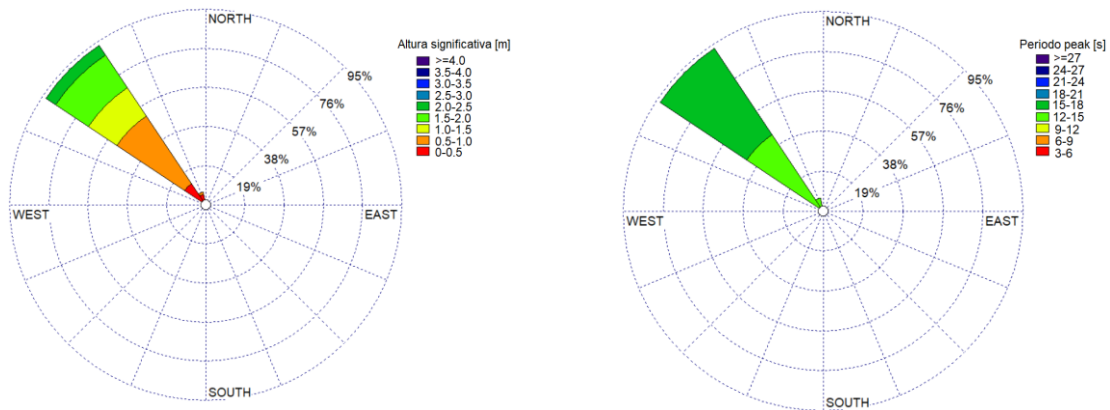


Ilustración 43: Rosas de parámetros del oleaje RCP 8.5 mediados de siglo.

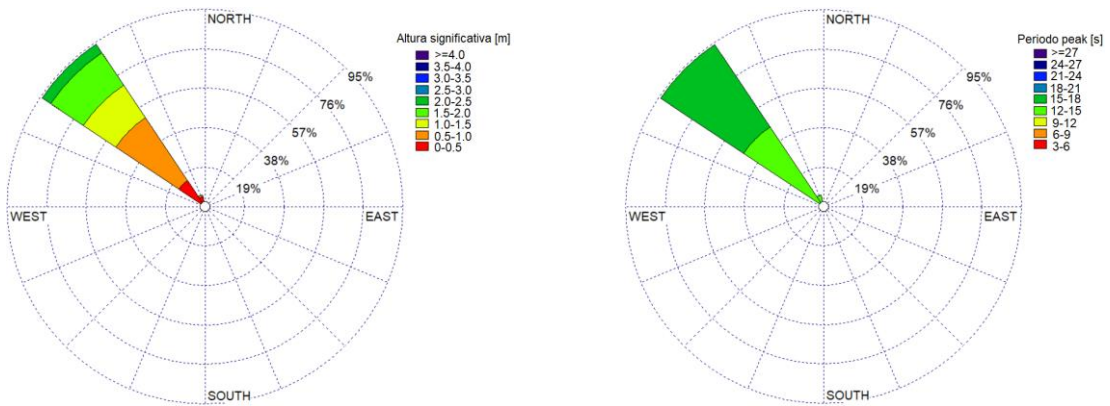


Ilustración 44: Rosas de parámetros del oleaje RCP 4.5 finales de siglo.

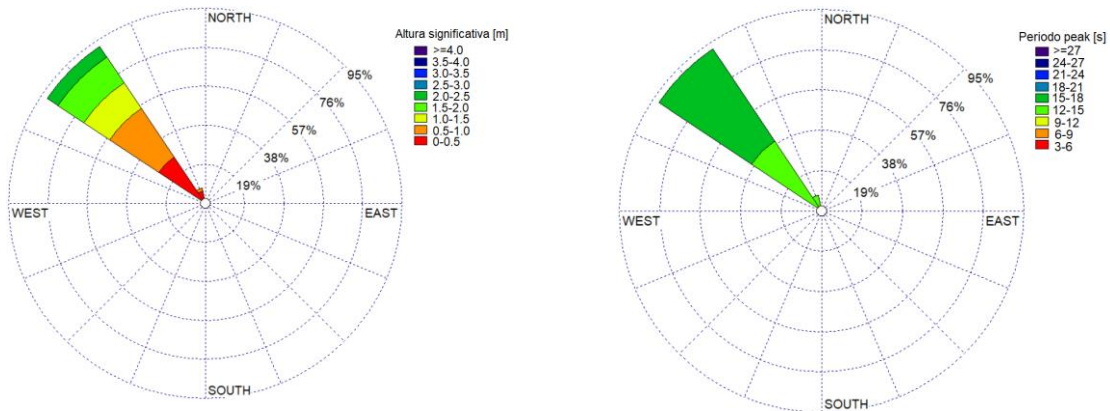


Ilustración 45: Rosas de parámetros del oleaje RCP 8.5 finales de siglo.

Detallando los dos rangos de alturas significativas, periodos *peak* y direcciones *peak* promedio mensuales que presentan los mayores porcentajes, se tiene: en los datos históricos un 74.46% de las alturas significativas promedio se encuentran en el rango [0 -

0.5[m] y un 22.31% en el rango [0.5 - 1.0[[m]. En las proyecciones de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo un 37.50 y un 40.42% se encuentran en el rango [0.5 – 1.0[[m], respectivamente. Un 23.75% de las alturas significativas promedio mensual del escenario RCP 4.5 de mediados de siglo se encuentra en el rango [1.0 – 1.5[[m] y un 18.75% de las alturas significativas promedio mensual del escenario RCP 8.5 de mediados de siglo se encuentra en el rango [1.5 – 2.0[[m].

En cuanto a los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo un 36.67% y un 33.33% de las alturas significativas promedio mensual se encuentran en los rangos [0.5 – 1.0[[m] y [0 – 0.5[[m], respectivamente. Un 20.42 y un 30% se encuentran en los rangos [0 – 0.5[y [0.5 - 1.0[[m] para los mismos escenarios, respectivamente.

En relación a los periodos un 95.43% de los datos históricos se encuentra en el rango [12 - 15[[s] y un 2.69% en el rango [9 - 12[[s]. En los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo un 48.33 y un 50% se encuentran en el rango [12 - 15[[s], respectivamente. En el rango [15 - 18] [s] se encuentran un 50 y un 49.17% de los periodos de las proyecciones para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo, respectivamente.

En cuanto a los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo un 52.08 y un 47.5% de los periodos se encuentran en el rango [12 - 15[[s], respectivamente. Un 47.5 y un 52.08% se encuentran en el rango [15 – 18[[s] para los mismos escenarios, respectivamente.

Con respecto a las direcciones promedio mensuales, un 71.77% de los datos históricos pertenecen al NNW y un 27.96% al NW. En las proyecciones de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo un 92.92% pertenecen a la dirección NW y un 6.67% corresponden a la dirección NNW, en ambos escenarios. En las proyecciones de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo un 93.75 y un 91.67% corresponden a la dirección NW, respectivamente. La segunda dirección que engloba los mayores porcentajes en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo es NNW con un 5.83 y un 7.92%, respectivamente.

Como se aprecia desde la Ilustración 41 a la Ilustración 45 y como se detalla en los párrafos anteriores existe una tendencia al aumento de los valores promedio mensuales de la altura significativa y de los periodos *peak* del oleaje debido al fenómeno de cambio climático. En relación a las direcciones promedio mensuales, estas presentan una tendencia hacia el Sur.

4.1.6 WAVE SETUP DEL OLAJE

El wave setup del oleaje es calculado mediante las ecuaciones presentes en USACE (2003). Para el cálculo de la altura de ola en rotura (H_b) se utiliza el criterio de McCowan (Sierra & Lo Presti, 1998) y se considera el fenómeno de refracción en una batimetría recta y paralela (G.I.O.C, 2000). Además, se asume que entre los 10 [m] de profundidad y la rompiente no existe refracción. De esta forma la altura significativa para cualquier profundidad se define como la ecuación (3), en la cual γ corresponde a una constante cuyo valor es 0.78, h a la profundidad, H_o a la altura significativa en aguas profundas y K_s al coeficiente de *shoaling*.

(3)

$$H = \min[\gamma h, H_o K_s]$$

Debido a que no se cuenta con los datos de profundidad ni de altura de rotura se procede a realizar un análisis a diferentes profundidades. Para lo cual se utilizó la altura significativa obtenida del clima extremo, con periodo de retorno de 70 años, propagada hasta 10 [m] de profundidad y se consideró que la rotura se produce cuando $\gamma h \leq H_0 K_s$.

El *wave setup* depende de la dirección del oleaje y de la altura significativa. De esta forma, existirán diferentes *wave setup* para cada uno de los escenarios RCP. Desde la Tabla 10 a la Tabla 13 se presentan los diferentes valores de *wave setup*, calculados considerando las alturas significativas propagadas a 10 [m] de profundidad, con periodo de retorno de 70 años. Las direcciones que se muestran pertenecen al rango de direcciones que engloba la línea de tendencia de mejor ajuste en cada uno de los registros de tormentas utilizados para realizar el análisis de clima extremo. Un ejemplo de esto se presenta en la Ilustración 40. En las tablas se incluye la dirección que posee la mayor altura significativa de las tormentas seleccionadas para la realización del análisis de clima extremo.

Tabla 10: Wave setup escenario RCP 4.5 mediados de siglo.

RCP 4.5 mediados de siglo			
Dirección	WSW	W	WNW
Hs70 [m]	2.18	5.93	8.45
Wave setup [m]	0.46	1.39	1.97

Tabla 11: Wave setup escenario RCP 8.5 mediados de siglo.

RCP 8.5 mediados de siglo				
Dirección	NNW	W	WNW	NW
Hs70 [m]	6.88	6.48	9.23	8.94
Wave setup [m]	1.58	1.48	2.15	2.06

Tabla 12: Wave setup escenario RCP 4.5 finales de siglo.

RCP 4.5 final de siglo			
Dirección	NNW	WNW	NW
Hs70 [m]	6.97	9.35	9.05
Wave setup [m]	1.58	2.15	2.15

Tabla 13: Wave setup escenario RCP 8.5 finales de siglo.

RCP 8.5 final de siglo			
Dirección	W	WNW	NW
Hs70 [m]	6.73	9.59	9.29
Wave setup [m]	1.58	2.25	2.15

4.1.7 MAREA ASTRONÓMICA

El análisis de marea armónica se desarrolla mediante la herramienta T_TIDE programada en MATLAB. T_TIDE ajusta los constituyentes armónicos de la marea por el método de mínimos cuadrados. La selección de los armónicos presentes en la serie de tiempo se

realiza mediante el criterio de Rayleigh (Foreman, 1977), el cual establece que si F_0 es la frecuencia de una componente a incluir en el análisis, F_1 la frecuencia de una componente ya incluida y T el periodo de tiempo de datos a analizar, la componente en cuestión solo se incluirá si $|F_0 - F_1|T \geq 1$. En el análisis presentado en este documento se incluyeron 29 constituyentes armónicos, 17 de ellos significativos ($\text{snr}^9 \geq 1$), entre los cuales se encuentra la componente lunar principal (M_2) que aporta el 42.20% de la energía de la onda de marea, el segundo constituyente en importancia es el solar principal (S_2) el cual aporta un 15.32% de la energía, mientras que los componentes de aguas someras, en su conjunto, aportan un 2.19%.

Los datos para la realización del estudio de marea armónica se obtuvieron desde la página *web sea level station monitoring facility* (<http://ioc-sealevelmonitoring.org/list.php>), desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) e *Intergovernmental Oceanographic Commission* (IOC). La estación seleccionada fue Valparaíso con una latitud -33.0273° y una longitud -71.6259° . La data utilizada comprende desde el 1 hasta el 31 de agosto del 2016, la longitud de la data es de 31 días siguiendo las recomendaciones del SHOA, con la finalidad de asegurar la ocurrencia de las cuatro fases lunares (SHOA, 1999).

En la Ilustración 46 se presentan la marea pronosticada y la marea meteorológica obtenidas del estudio de marea armónica. Del mismo análisis se obtiene un nivel de reducción de sonda (en adelante NRS) de 1.2 [m] con respecto al cero del registro instrumental (SHOA, 2011).

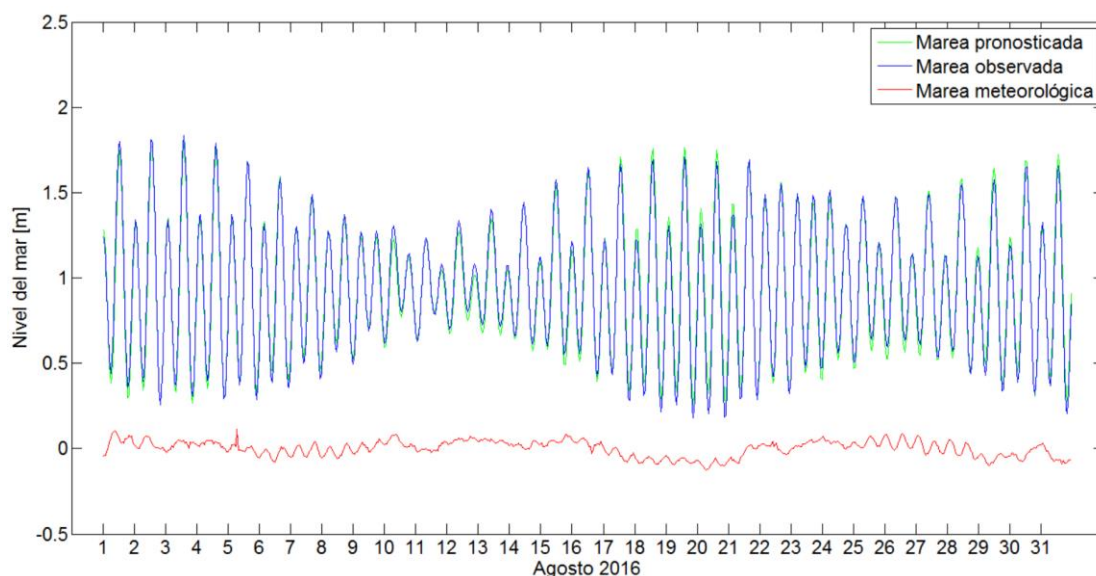


Ilustración 46: Estudio de marea astronómica.

Con los mismos registros de desnivelaciones del nivel del mar utilizados para la realización del estudio de marea armónica se realiza un análisis de los valores no armónicos de la marea (SHOA, 1999). Los resultados de este son reducidos al NRS y presentados en la

⁹ Signal to noise ratio (snr), parámetro que entrega una relación al cuadrado entre la amplitud y el error de la amplitud.

Tabla 14. En la Ilustración 47 se presenta la frecuencia acumulada en porcentaje de diversos rangos de marea obtenidos mediante dicho análisis.

Tabla 14: Análisis de valores no armónicos de la marea

Altura media de la pleamar [m]	1.37
Altura media de la bajamar [m]	0.42
Altura media de la pleamar más alta [m]	1.53
Altura media de la bajamar más baja [m]	0.37
Nivel medio de la marea [m]	0.89

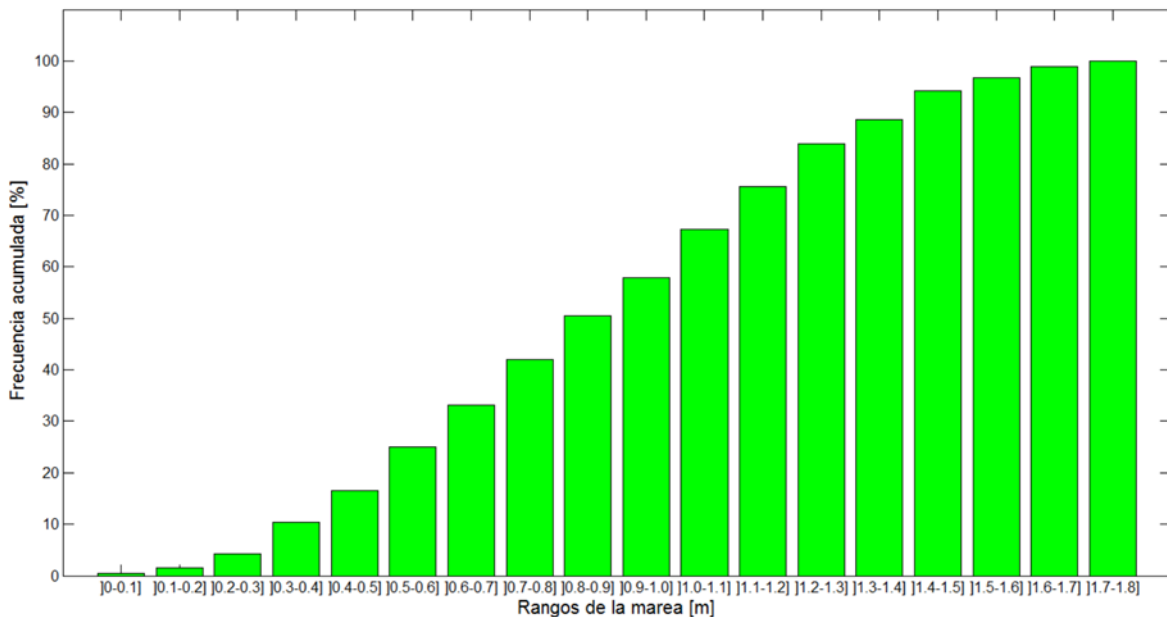


Ilustración 47: Frecuencia acumulada [%] de rangos de la marea.

4.1.8 MAREA METEOROLÓGICA

Los datos de eventos extremos de marea meteorológica para diferentes horizontes de tiempo utilizados para la realización del diseño de los rompeolas en talud se obtuvieron desde CEPAL (2015). Dicho estudio está basado en los Escenarios de Emisiones (en adelante IE-EE), utilizados en el Tercer y Cuarto Informe de evaluación del IPCC, los cuales son anteriores a los escenarios RCP empleados para la realización de este trabajo. Sin embargo, como se expuso en el subcapítulo 3.3 no existen grandes diferencias en las proyecciones de la temperatura global entre ambos grupos de escenarios, y como se puede apreciar en la Ilustración 1 existen dos escenarios IE-EE que se asemejan en el forzamiento radiativo a los escenarios RCP. De esta forma el escenario RCP 8.5 es semejante con la serie de escenarios A2 y RCP 4.5 es semejante con la serie de escenarios B1. Por lo expuesto en este párrafo las proyecciones basadas en los escenarios IE-EE son utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

Las tendencias del nivel medio del mar, del nivel medio del mar relativo y de los eventos extremos de marea meteorológica, presentadas en el subcapítulo 4.1.8 y 4.1.9, están

basadas en series históricas de las dinámicas de alta resolución y en simulaciones basadas en los IE-EE. Estos dos tipos de información se evaluaron en un determinado año horizonte a lo largo del siglo XXI mediante dos métodos:

- Obtención de tendencias a largo plazo y extrapolación a los años horizonte considerados: Esta técnica es de extrapolación de tendencias a partir del desarrollo de modelos estadísticos que tienen en cuenta la variación de largo plazo de cada variable, así como su incertidumbre. En esta técnica se asume que la inercia del sistema climático se mantiene constante, es decir, el aumento en la velocidad de emisión de los GEI no existe, lo cual es errado. Sin embargo, la ventaja que posee esta técnica es que se pueden utilizar series históricas largas de alta calidad (CEPAL, 2015).
- Obtención de un modelo de regresión a partir de datos históricos¹⁰: En esta técnica la variable independiente (el predictor) es un patrón a escala regional o global y la variable dependiente (el predictando) es el agente que se quiere encontrar. En general, esta técnica es un modelo de regresión que correlaciona el agente con diversos índices climáticos (CEPAL, 2015).

El nodo de extracción de las proyecciones del nivel medio del mar, nivel medio del mar relativo y de eventos extremos de marea meteorológica posee una latitud -32.936° y una longitud -71.632° .

La Tabla 15 presenta valores de eventos extremos de marea meteorológica, para la costa de Valparaíso con periodos de retorno (Tr) de 20, 100, 250 y 500 años, calculados en los años 2010 y 2040 mediante un análisis de extremos basado en una distribución Generalizada de Extremos (GEV) y aplicada a los máximos mensuales. Se debe tener presente que dichos valores representan la media de todos los escenarios IE-EE.

Tabla 15: Eventos extremos de marea meteorológica [m] con distintos periodos de retorno.

Tr [años]	2010	2040
50	0.36	0.37
100	0.43	0.44
250	0.53	0.54
500	0.63	0.63

Fuente: (CEPAL, 2015).

¹⁰ Los datos históricos de la marea meteorológica son obtenidos desde Global Ocean Surges (GOS)-Instituto de Hidráulica Ambiental de Cantabria y poseen una cobertura temporal desde 1948 hasta 2010 con una resolución espacial de 0.25 y 0.5°. Mientras que los registros históricos del nivel medio del mar global son obtenidos desde CSIRO que poseen una cobertura temporal, mensual, desde 1950 a 2009 y una resolución espacial global de 1°, y, desde mareógrafos UHSLC University of Hawaii Sea Level Center con una cobertura temporal variable (CEPAL, 2015).

4.1.9 NIVEL MEDIO DEL MAR

En la Tabla 16 de este subcapítulo se presentan las tendencias del nivel medio del mar (*Relative Sea Level*, SLR) y del nivel medio del mar relativo (*Relative Sea Level Rise*, RSLR) para el año horizonte 2040. El nivel medio del mar relativo es aquel que contempla el efecto de hundimiento o elevación de la tierra por el ajuste glaciario-isostático (GIA). Los valores de subsidencia o elevación de la tierra fueron obtenidos mediante los cálculos de Peltier (2000) e interpolados utilizando el método de ponderación de la distancia inversa (*Inverse Distance Weighting*, IDW), método que consiste en asignar pesos a los datos muestreados, que luego serán interpolados, con la finalidad de determinar el dato central en función inversa a la distancia que los separa (Alvarez *et al.*, 2011).

Tabla 16: Nivel del mar y nivel del mar relativo para el año 2040

Ascenso del nivel del mar relativo (RSLR) [mm]	64.64
Ascenso medio del nivel del mar (SLR) [mm]	78.38
Tendencia media de aumento RSL [mm/año]	2.61
Tendencia de aumento RSLR [mm/año]	2.16

Fuente: (CEPAL, 2015).

Debido a que las tendencias medias del SLR y del RSLR para el año 2070 no se encuentran disponibles para descargar, esta información es tomada desde la Ilustración 48 a la Ilustración 51 presentes en CEPAL (2015). En la Ilustración 48 se observa que la tendencia del SLR para el periodo de años 2040-2070 es de aproximadamente 3 mm/año para la costa de Valparaíso, valor que posee una incertidumbre (intervalo de confianza del 95%) de 2.7 mm. La tendencia del RSLR para el mismo periodo de años es de aproximadamente 2.5 mm/año, lo que se puede observar en la Ilustración 49. Los valores medios del SLR y del RSLR, para el año horizonte 2070, son de 161 y 134 [mm], respectivamente, valores que pueden ser visualizados en la Ilustración 50 e Ilustración 51.

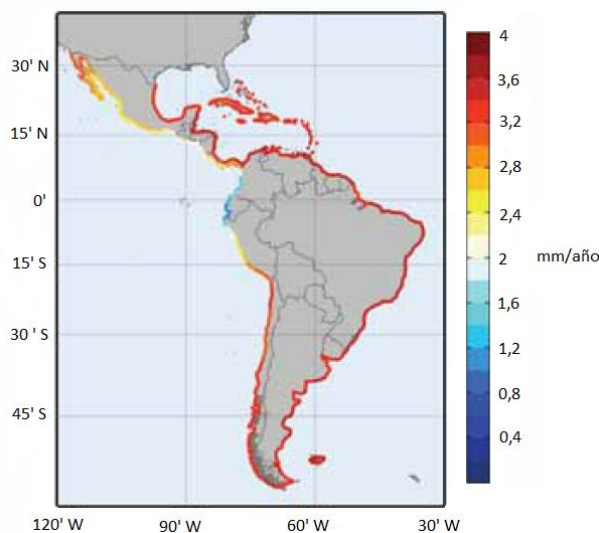


Ilustración 48: Tendencia media del nivel medio del mar en el periodo 2040-2070.
Fuente: (CEPAL, 2015).

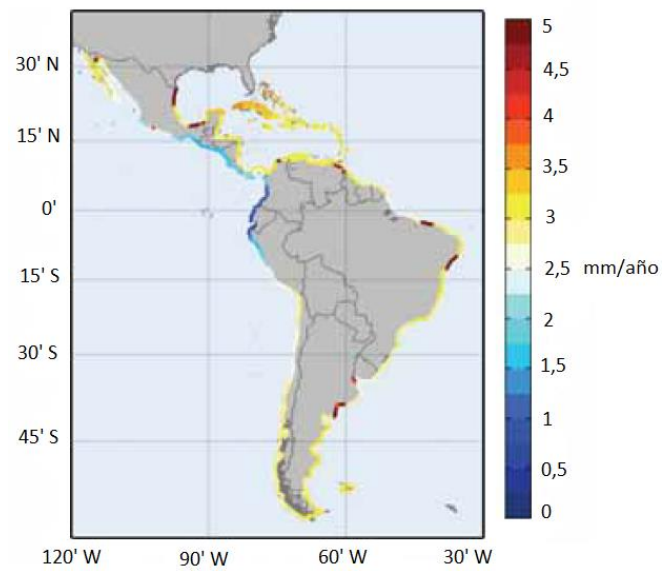


Ilustración 49: Tendencia media del nivel medio del mar relativo en el periodo 2040- 2070.
Fuente: (CEPAL, 2015).

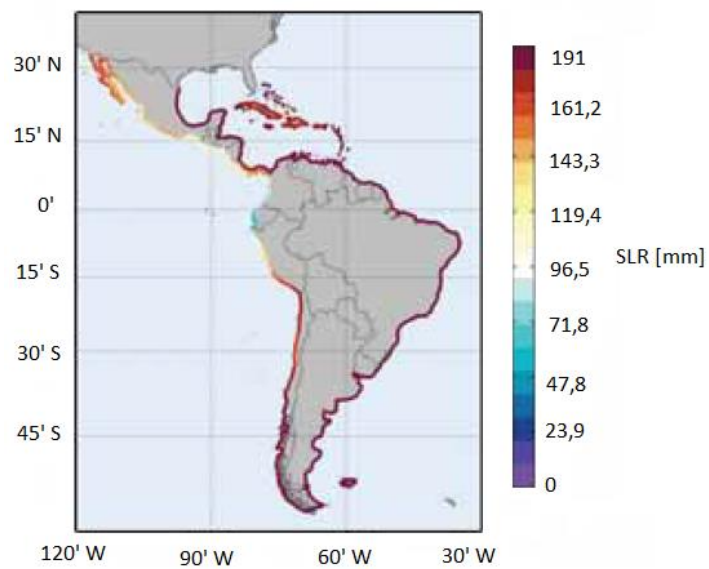


Ilustración 50: Valor medio del nivel medio del mar en el año 2070.
Fuente: (CEPAL, 2015).

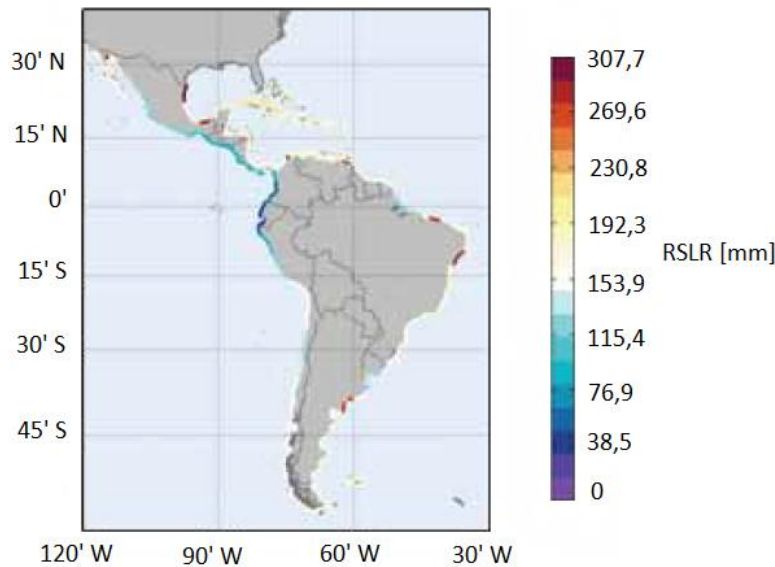


Ilustración 51: Valor medio del nivel medio del mar relativo en el año 2070.
Fuente: (CEPAL, 2015).

4.2 DISEÑO DE ROMPEOLAS EN TALUD: CORRELACIÓN DE VARIABLES

Habiendo identificado y descrito el nivel medio del mar, la marea meteorológica, el *wave setup*, la altura significativa de eventos extremos y la marea astronómica en la costa de Valparaíso, se procede a relacionar dichas variables con la finalidad de diseñar diferentes rompeolas en talud para cada uno de los escenarios RCP contemplados en este trabajo.

4.2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Como área de estudio se seleccionó Avenida Perú, ubicada al costado norte del estero Marga-Marga, en la ciudad de Viña del mar, V Región de Valparaíso (Ilustración 52).

Los diseños de los rompeolas en talud se realizan en la V Región, ya que como indica Campos (2016), es la región que posee una mayor cantidad de daños debido a marejadas. En su estudio se analizaron diversos tipos de daños, entre los que se incluyen: sobrepaso (43¹¹), daño a estructura costera (24), daño a locales comerciales y viviendas (17), cierre de puertos (35), daño a embarcaciones (291) y daño a integridad física humana (9). Dentro de la Región se escogió el paseo costero de Avenida Perú, ya que como indica el mismo autor es una de las zonas que más ha experimentado situaciones de sobrepaso en época de temporales. Con las variaciones que conlleva el cambio climático en las diferentes variables meteoceanográficas, es esperable que estas situaciones de sobrepaso y diferentes tipos de daños se vean intensificadas.

¹¹ Valores señalan las veces que se identificaron diversos tipos de daños (Campos, 2016).



Ilustración 52: Ubicación área de estudio.

4.2.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El primer paso para diseñar una obra de abrigo es calcular el periodo de retorno (T_r), el cual tiene relación con la vida útil (L_f) proyectada de la estructura y con los riesgos máximos admisibles (R). La vida útil y el riesgo se calculan a partir de la Tabla 17 y Tabla 18, respectivamente.

Tomando en cuenta una infraestructura de carácter general y un nivel 1, se obtiene una vida útil de 25 años. Considerando, además, una posibilidad de pérdida de vidas humanas reducida y un índice de repercusión económica, para fines académicos, medio en caso de inutilización de la obra, se obtiene un riesgo máximo admisible de 0.3, valor calculado como riesgo de iniciación de averías.

Tabla 17: Vidas útiles mínimas para obras e instalaciones de carácter definitivo.

TIPO DE OBRA O INSTALACIÓN	NIVEL DE SEGURIDAD REQUERIDO		
	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL	25	50	100
DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO	15	25	50
<p>LEYENDA:</p> <p>INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL: Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto.</p> <p>DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO: Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo,...).</p> <p>NIVEL 1: Obras e instalaciones de interés local o auxiliares. Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura. (Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones,...).</p> <p>NIVEL 2: Obras e instalaciones de interés general. Riesgo moderado de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura. (Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...).</p> <p>NIVEL 3: Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional. Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura. (Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).</p>			

Fuente: (Gobierno de España, 1990).

Tabla 18: Riesgos máximos admisibles.

a) RIESGO DE INICIACIÓN DE AVERÍAS			
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
Índice $r = \frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	BAJA	0,50	0,30
	MEDIA	0,30	0,20
	ALTA	0,25	0,15

b) RIESGO DE DESTRUCCIÓN TOTAL			
REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA.		POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS	
		REDUCIDA	ESPERABLE
Índice $r = \frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$	BAJA	0,20	0,15
	MEDIA	0,15	0,10
	ALTA	0,10	0,05

Se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o el de destrucción total según las características de deformabilidad y de posibilidad o facilidad de reparación de la estructura resistente.
 Para obras rígidas o de rotura frágil sin posibilidad de reparación se adoptará el riesgo de destrucción total.
 Para obras flexibles, semirígidas o de rotura en general reparable (daños menores que un nivel prefijado función del tipo estructural) se adoptará el riesgo de iniciación de averías.
 En este tipo de obras podrá adoptarse también el riesgo de destrucción total, definiendo para cada tipo estructural el nivel de daños aceptado como de destrucción total. La acción resultante se considerará como accidental.

LEYENDA:

- POSIBILIDAD DE PÉRDIDAS HUMANAS
 - Reducida: Cuando no es esperable que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños.
 - Esperable: Cuando es previsible que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños.
- REPERCUSIÓN ECONÓMICA EN CASO DE INUTILIZACIÓN DE LA OBRA
 - Índice $r = \frac{\text{Coste de pérdidas directas e indirectas}}{\text{Inversión}}$
 - BAJA: $r \leq 5$
 - MEDIA: $5 < r \leq 20$
 - ALTA: $r > 20$

Fuente: (Gobierno de España, 1990).

Una vez obtenida la vida útil, y el riesgo máximo admisible se puede calcular el periodo de retorno, el cual viene determinado por la ecuación (4) (Gobierno de España, 1990). Esta ecuación es utilizada para obras e instalaciones cuyas vidas útiles sean mayores o iguales a 10 años, con la cual se obtiene un periodo de retorno de 70 años.

(4)

$$T_r = \frac{L_f}{-\ln(1 - R)}$$

4.2.3 NIVEL DE DISEÑO

El nivel de diseño se calcula mediante la ecuación (5) en la cual ΔNMM corresponde a la variación del nivel medio del mar debida al cambio climático; Z_{MA} a la desnivelación debida a la marea astronómica y Z_{MM} desnivelación debida a la marea meteorológica.

(5)

$$N_D = \Delta\text{NMM} + Z_{MA} + Z_{MM} + \text{Wave setup}$$

Para la marea astronómica se selecciona un valor de 1.37 [m], que corresponde a la altura media de la pleamar. La selección de este valor se realiza tomando en consideración un diseño conservador. La frecuencia acumulada es de 88.6%, ya que como se observa en la Ilustración 47, este valor está en el rango de [1.3 - 1.4[[m].

Debido a que los valores de eventos extremos de marea meteorológica no contemplan un periodo de retorno de 70 años, valor que corresponde al periodo de retorno de los rompeolas en talud calculado en el subcapítulo 4.2.2, se realiza una interpolación¹² con la finalidad de obtener el valor de evento extremo de marea meteorológica asociado al periodo de retorno de 70 años. Los resultados de la interpolación son presentados en la Tabla 19.

Tabla 19: Interpolación marea meteorológica.

Tr [años]	2010	2040
50	0.36	0.37
60	0.37	0.38
70	0.39	0.40
80	0.40	0.41
90	0.42	0.43
100	0.43	0.44

De acuerdo a lo presentado en la Tabla 19, se utiliza un valor de desnivelación debida a la marea meteorológica de 0.39 [m] para los diseños de rompeolas de mediados de siglo (2026-2045), es decir, aquellos diseños realizados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados de siglo. Y un valor de 0.40 [m] para aquellos diseños realizados bajo los escenarios RCP4.5 y RCP 8.5 de finales de siglo (2081-2100).

La variación del nivel medio del mar (subcapítulo 4.1.9) corresponde a 0.078 [m] para aquellos diseños realizados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados de siglo y a 0.16 [m] para aquellos diseños realizados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de finales de siglo.

El *wave setup* depende de la dirección del oleaje y de la altura significativa, por lo tanto, depende del escenario bajo el cual se esté diseñando. Los valores del *wave setup* son expuestos desde la Tabla 10 a la Tabla 13. Se selecciona la dirección más desfavorable para el diseño de los rompeolas en talud, es decir, aquella dirección que presenta las mayores alturas significativas con periodos de retorno de 70 años (en adelante $H_s 70$), y por ende exhibe los mayores *wave setup*. Los valores de los *wave setup* seleccionados, la altura significativa del clima extremo interpolada correspondiente a un periodo de retorno de 70 años y propagada hasta 10 [m] de profundidad junto con la dirección más desfavorable para el diseño de los rompeolas en talud para cada uno de los escenarios RCP son presentados en la Tabla 20.

¹² La interpolación se lleva a cabo mediante un script en MATLAB utilizando el comando interp1.

Tabla 20: Interpolación wave setup.

	RCP 4.5 mediados de siglo	Rcp 8.5 mediados de siglo	RCP 4.5 final de siglo	RCP 8.5 final de siglo
Dirección	WNW	WNW	WNW	WNW
Hs70 [m]	8.45	9.23	9.35	9.59
Wave setup [m]	1.97	2.15	2.15	2.25

En este subcapítulo se seleccionaron las variables relacionadas con el nivel de diseño de los rompeolas en talud, las cuales pueden ser visualizadas en la Tabla 21. Se escogió un nivel de marea meteorológica de eventos extremos, un *wave setup* más desfavorable y un nivel de marea astronómica correspondiente a la altura media de la pleamar. Todos estos factores fueron seleccionados con la base de un diseño conservador, y si bien no es común que se presenten todos estos factores en sus condiciones máximas, esto sí ha ocurrido en el pasado. Un claro ejemplo de esto fue lo sucedido el 8 de agosto del 2015, donde se combinaron cuatro variables meteoceanográficas (viento, oleaje, presión atmosférica y marea astronómica) generando una condición extrema. Esto sumado a la exposición de la Bahía de Valparaíso al oleaje proveniente del cuarto cuadrante provocó daños en el borde costero con un costo superior a los \$5000 millones (Winckler *et al.*, 2015).

Tabla 21: Resumen parámetros del nivel de diseño.

	Mediados de siglo		Finales de siglo	
	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Marea astronómica [m]	1.37	1.37	1.37	1.37
Marea meteorológica [m]	0.39	0.39	0.40	0.40
Variación del nivel del mar [m]	0.08	0.08	0.16	0.16
Wave setup [m]	1.97	2.15	2.15	2.25
Total [m]	3.81	3.99	4.08	4.18

4.2.4 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD

4.2.4.1 Altura significativa de diseño

Este parámetro es utilizado para el diseño de los rompeolas en talud, ya que dichas estructuras tienen un modo de fallo gradual.

El cálculo de la altura significativa de diseño (en adelante H_s diseño), también denominada altura de ola al pie de la obra se realiza mediante la ecuación (6) (OCDI, 2002), en la cual θ corresponde a la pendiente de fondo, K_s al coeficiente de *shoaling* obtenido mediante la Ilustración 53, L_0 corresponde a la longitud de ola en aguas profundas y H_0' corresponde a la altura significativa equivalente en aguas profundas. Esta última es calculada utilizando la altura significativa con periodo de retorno de 70 años, la cual fue propagada a 10 [m] de profundidad y multiplicada por el coeficiente de *shoaling* lineal, coeficiente obtenido mediante la ecuación (7) (USACE, 2002). El criterio $d/L_0 \geq 0.2$ es utilizado para condición de oleaje no rompiente, mientras que el criterio $d/L_0 < 0.2$ es para condición de oleaje progresivo. d corresponde a la profundidad total.

(6)

$$H_{1/3} = \begin{cases} K_s H_0' & : d/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{\beta_0 H_0' + \beta_1 d, \beta_{\max} H_0', K_s H_0'\} & : d/L_0 < 0.2 \end{cases}$$

Donde

$$\left. \begin{aligned} \beta_0 &= 0.028 (H_0'/L_0)^{-0.38} \exp[20(\tan\theta)^{1.5}] \\ \beta_1 &= 0.52 \exp[4.2 \tan\theta] \\ \beta_{\max} &= \max\{0.92, 0.32 (H_0'/L_0)^{-0.29} \exp[2.4 \tan\theta]\} \end{aligned} \right\}$$

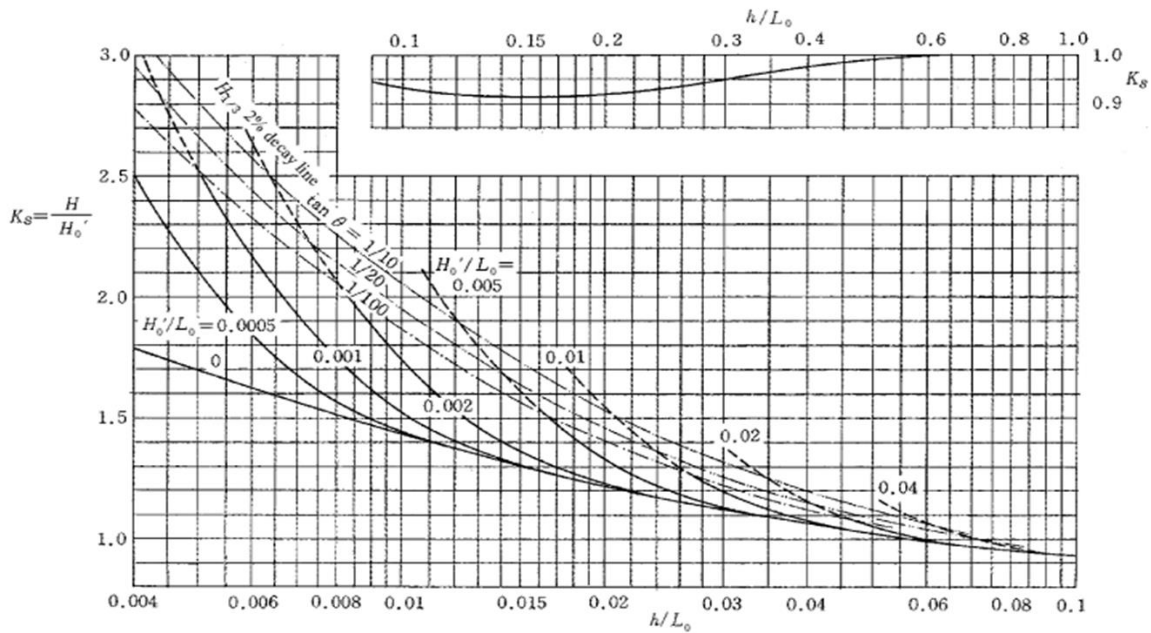


Ilustración 53: Coeficiente de *shoaling*.
Fuente: (OCDI, 2002).

(7)

$$K_s \text{ lineal} = \frac{1}{\sqrt{2n * \tanh(Kd)}}$$

4.2.4.2 Rompeolas en talud

El peso de los elementos que componen la coraza de los rompeolas en talud diseñados en esta memoria de proyecto de título es calculado como la media aritmética entre los resultados de la ecuación (8) y la ecuación (9), las cuales se presentan en USACE (2011) y corresponden a las formulaciones de Hudson y Van der Meer, respectivamente.

En la ecuación (8) H es la altura significativa, ρ_s la densidad de rocas, ρ_a la densidad del agua, α el ángulo de la pendiente del rompeolas y K_D el coeficiente de estabilidad. Algunos valores del coeficiente de estabilidad son presentados en la Tabla 22.

En la ecuación (9) H_s es la altura significativa, D_{n50} la longitud equivalente de una roca media de la coraza, P la permeabilidad teórica (Ilustración 54), S el área relativa erosionada (Tabla 23), N_z el número de olas, α el ángulo de la pendiente del rompeolas en talud y Δ es igual a $(\rho_s/\rho_a) - 1$, donde ρ_s es la densidad de la roca y ρ_a la densidad del agua.

(8)

$$\frac{H}{\Delta D_{n50}} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \quad \text{o} \quad M_{50} = \frac{\rho_s H^3}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_a} - 1\right)^3 \cot \alpha}$$

(9)

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 \cdot S^{0.2} P^{0.18} N_z^{-0.1} \xi_m^{-0.5} \quad \text{Para} : \xi_m < \xi_{mc}$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 \cdot S^{0.2} P^{-0.13} N_z^{-0.1} (\cot \alpha)^{0.5} \xi_m^P \quad \text{Para} : \xi_m > \xi_{mc}$$

$$\xi_m = s_m^{-0.5} \tan \alpha$$

$$\xi_{mc} = \left(6.2 P^{0.31} (\tan \alpha)^{0.5}\right)^{1/(P+0.5)}$$

Tabla 22: Valores sugeridos para el coeficiente de estabilidad.

Unidades de armaduras	n	Colocación	Estructura de tronco		Estructura de cabeza		Pendiente cot σ
			K_D		K_D		
			Olas en rompiente	Olas no rompiente	Olas en rompiente	Olas no rompiente	
Piedra de cantera	2	Aleatoria	1.2	2.4	1.1	1.9	1.5 a 3.0
Redondeada lisa							
Redondeada lisa							
Angular rugosa	1	Aleatoria		2.9		2.3	
Angular rugosa	2	Aleatoria	2.0	4.0	1.9	3.2	1.5
					1.6	2.8	2.0
					1.3	2.3	3.2
Angular rugosa	>3	Aleatoria	2.2	4.5	2.1	4.2	
Angular rugosa	2	Especial	5.8	7.0	5.3	6.4	
Paralelepipedo	2	Especial	7.0 - 20.0	8.5 - 24.0			
Tetrápodo y cuadrípode	2	Aleatoria	7.0	8.0	5.0	6.0	1.5
					4.5	5.5	2.0
					3.5	4.0	3.0
Tribar	2	Aleatoria	9.0	10.0	8.3	9.0	1.5
					7.8	8.5	2.0
					6.0	6.5	3.0
Dolos	2	Aleatoria	15.8	31.8	8.0	16.0	2.0
					7.0	14.0	3.0
Cubos modificados	2	Aleatoria	6.5	7.5		5.0	
Hexápodo	2	Aleatoria	8.0	9.5	5.0	7.0	
Toakane	2	Aleatoria	11.0	22.0			
Tribar	1	Uniforme	12.0	15.0	7.5	9.5	
Piedra de cantera							
Angular graduada		Aleatoria	2.2	2.5			

Fuente: Modificado desde (USACE, 1984)

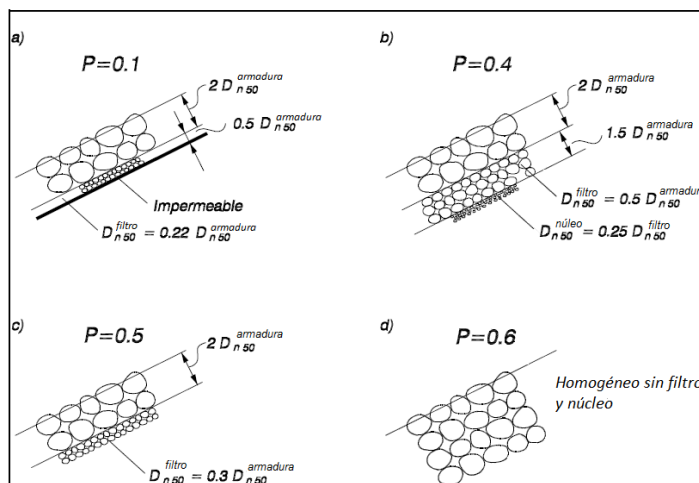


Ilustración 54: Coeficientes de permeabilidad teórica.

Fuente: (USACE, 2011).

Tabla 23: Valores para el área relativa erosionada.

Unit	Slope	Initial damage	Intermediate damage	Failure
Rock	1 : 1.5	2	3-5	8
Rock	1 : 2	2	4-6	8
Rock	1 : 3	2	6-9	12
Rock	1 : 4 - 1 : 6	3	8-12	17

Fuente: (USACE, 2011).

El peso de los elementos que componen el filtro y núcleo de un rompeolas en talud son calculados mediante la Ilustración 55. Esta ilustración indica que los pesos de los elementos del núcleo deben estar en razón 1:200 a 1:6000 del peso de los elementos de la coraza, mientras que los pesos de los elementos del filtro deben estar en razón 1:10 a 1:15 del peso de los elementos de la coraza. Para el diseño de los cuatro rompeolas en talud de esta memoria de proyecto de título se utiliza la relación 1:10 para el peso de los elementos del filtro y de 1:200 para el peso de los elementos del núcleo.

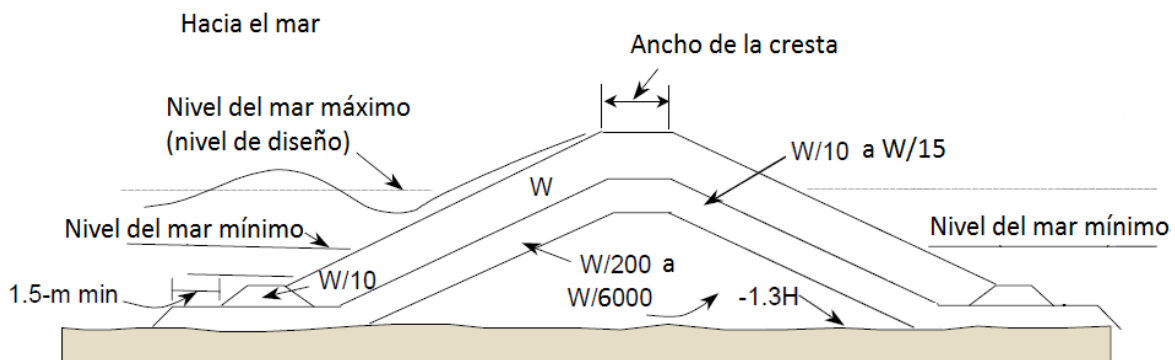


Ilustración 55: Peso de los elementos del núcleo, filtro y coraza de un rompeolas en talud.

Fuente: Adaptada desde (USACE, 2011).

4.2.4.3 Sobrepaso

El sobrepaso se calcula a partir de la ecuación presente en EurOtop (2007), en la cual se realiza un despeje de la abreviatura R_c , correspondiente al francobordo (distancia entre el nivel de diseño y la cota de coronamiento del rompeolas). Se emplea además la Ilustración 56, en la cual se considera que no exista daño en la estructura. De esta forma el valor del caudal máximo admisible utilizado es de $0.01 \text{ [m}^3/\text{s]}$ por metro.

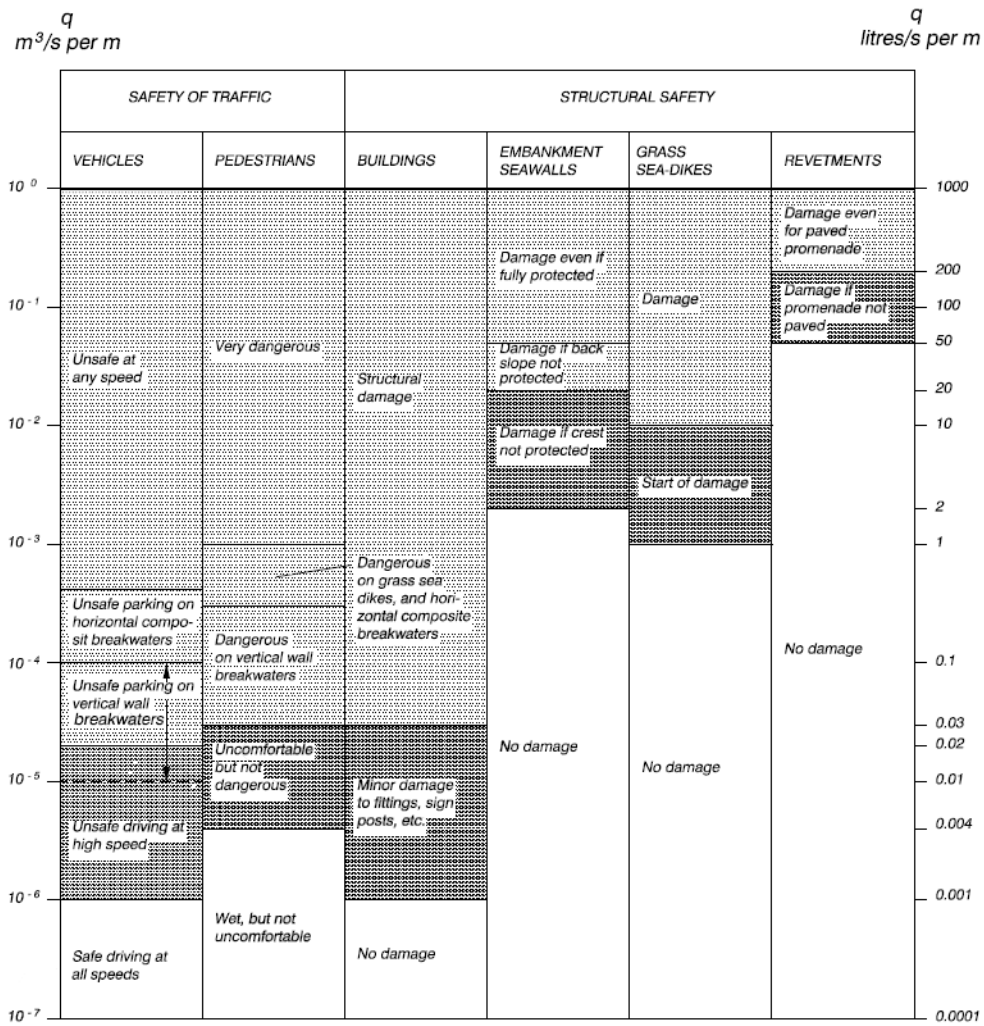


Ilustración 56: Valores del caudal máximo admisible.
 Fuente: (USACE, 2011).

5 RESULTADOS: CARÁCTER PREDICTIVO DE LA INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de los diversos diseños de los rompeolas en talud, diseñados bajo los cuatro escenarios RCP que se contemplan en este trabajo.

En la actualidad el diseño de infraestructura costera se realiza en base a las condiciones de oleaje históricas. En esta memoria de proyecto de título se diseña con condiciones futuras conservadoras. Se les denomina conservadoras ya que, según lo expuesto en este trabajo, debido al fenómeno de cambio climático las variables meteoceanográficas tienden a aumentar en el transcurso del siglo.

5.1.1 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD RCP 4.5 Y RCP 8.5 MEDIADOS DE SIGLO

En la Ilustración 57 se presentan las definiciones geométricas expuestas en este subcapítulo.

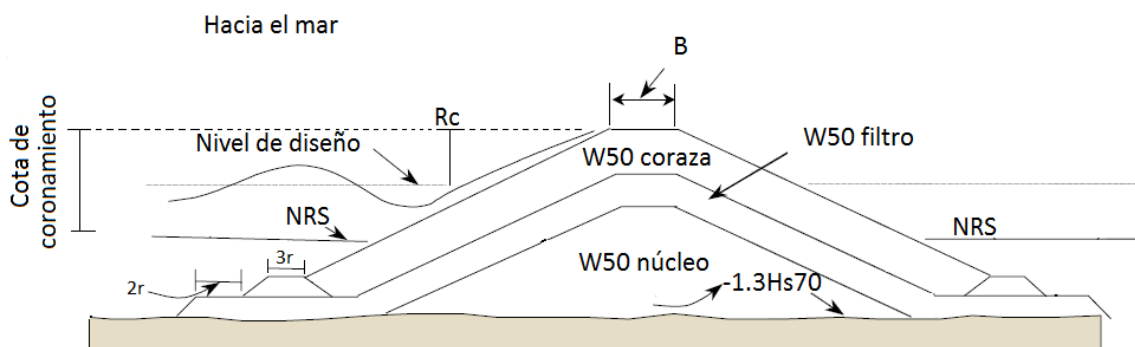


Ilustración 57: Definiciones geométricas rompeolas en talud.

Fuente: Adaptada desde (USACE, 2011).

En la Tabla 24 a) se presentan los parámetros utilizados para el diseño de los rompeolas en talud bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo con una pendiente 1:2. En la Tabla 24 b) se presentan los parámetros utilizados para el diseño de los rompeolas en talud bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo con una pendiente 1:1.5. En ambas tablas se presentan también los resultados del diseño.

Tabla 24: Parámetros y resultados diseño rompeolas RCP 4.5 y 8.5 mediados de siglo.

a)	RCP 4.5	RCP 8.5	b)	RCP 4.5	RCP 8.5
H _s diseño [m]	3.14	3.33	H _s diseño [m]	3.14	3.33
Nivel de diseño [m]	3.81	3.99	Nivel de diseño [m]	3.81	3.99
ρ _r [Kg/m ³]	2700	2700	ρ _r [Kg/m ³]	2700	2700
ρ _a [Kg/m ³]	1025	1025	ρ _a [Kg/m ³]	1025	1025
K _D	2	2	K _D	2	2
α	0.46	0.46	α	0.59	0.59
cotg α	2.00	2.00	cotg α	1.50	1.50
tan α	0.50	0.50	tan α	0.67	0.67
Ts [s]	14.61	15.44	Ts [s]	14.61	15.44
Tm [s]	12.17	12.87	Tm [s]	12.17	12.87
Lom [m]	231.30	258.53	Lom [m]	231.30	258.53
Sm	0.01	0.01	Sm	0.01	0.01
S	2	2	S	2	2
P	0.4	0.4	P	0.4	0.4
Nz	7500	7500	Nz	7500	7500
ξ _m	4.29	4.40	ξ _m	5.72	5.87
ξ _{mc}	3.77	3.77	ξ _{mc}	4.42	4.42
W50 Hudson [Tn]	4.79	5.72	W50 Hudson [Tn]	6.39	7.63
Dn50 Hudson [m]	1.21	1.28	Dn50 Hudson [m]	1.33	1.41
W50 Van der Meer [Tn]	7.92	9.17	W50 Van der Meer [Tn]	8.63	9.99
Dn50 Van der Meer [m]	1.43	1.50	Dn50 Van der Meer [m]	1.47	1.55
W50 promedio coraza [Tn]	6.36	7.44	W50 promedio coraza [Tn]	7.51	8.81
Dn50 promedio coraza [m]	1.33	1.40	Dn50 promedio coraza [m]	1.41	1.48
W50 filtro [Tn]	0.64	0.74	W50 filtro [Tn]	0.75	0.88
Dn50 filtro [m]	0.62	0.65	Dn50 filtro [m]	0.65	0.69
W50 núcleo [Tn]	0.03	0.04	W50 núcleo [Tn]	0.04	0.04
Dn50 núcleo [m]	0.23	0.24	Dn50 núcleo [m]	0.24	0.25
Ancho berma [m]	3.70	3.91	Ancho berma [m]	3.92	4.13
Largo berma [m]	2.47	2.60	Largo berma [m]	2.61	2.75
Rc [m]	3.02	3.26	Rc [m]	3.02	3.26
Cota de coronamiento [m]	6.83	7.25	Cota de coronamiento [m]	6.83	7.25

Se utiliza un coeficiente de estabilidad (K_D) de 2 considerando una estructura tronco, roca con canto anguloso, una colocación aleatoria y olas rompiendo. El periodo (T_s) de la altura significativa es calculado mediante la ecuación (1) presentada en esta memoria de proyecto de título, mientras que el periodo medio (T_m) se obtiene mediante la relación de periodos expuesta en Goda (2000), la cual indica que $T_s=1.2T_m$. La abreviatura Lom corresponde a la longitud de onda del periodo medio. Se selecciona un valor del área relativa erosionada (S) de 2 considerando un daño inicial y una permeabilidad teórica (P) de 0.4 contemplando un diseño de talud compuesto de tres capas; coraza, filtro y núcleo. Para el número de ondas (N_z) se selecciona un valor de 7500, debido a que después de este valor se alcanza, aproximadamente, un equilibrio en el daño (USACE, 2011). El parámetro de semejanza de surf (ϵ_m y ϵ_{mc}) se obtiene desde las ecuaciones presentes en USACE (2011).

La Ilustración 58 expone el peso de los elementos de coraza de los rompeolas diseñados bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo (2026-2045) para taludes 1:1.5 y 1:2.

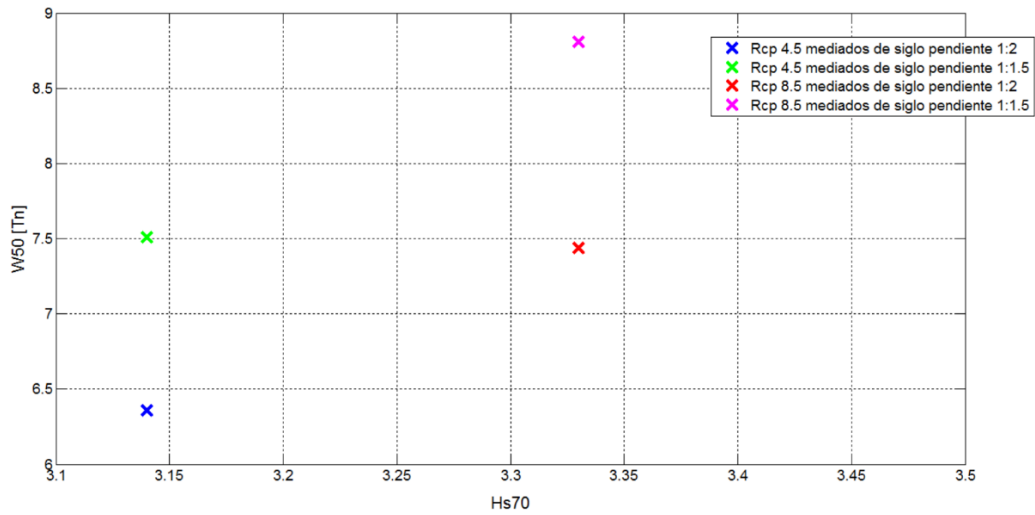


Ilustración 58: Comparación de diseños rompeolas con distintos taludes para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo.

5.1.2 DISEÑO ROMPEOLAS EN TALUD RCP 4.5 Y RCP 8.5 FINALES DE SIGLO

En la Tabla 25 a) se presentan los parámetros utilizados para el diseño de los rompeolas en talud bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo con pendiente 1:2. En la Tabla 25 b) se presentan los parámetros utilizados para el diseño de los rompeolas en talud bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo con una pendiente 1:1.5. En ambas tablas se incluyen los resultados del diseño.

Tabla 25: Parámetros y resultados diseño rompeolas RCP 4.5 y 8.5 finales de siglo.

a)	RCP 4.5	RCP 8.5	b)	RCP 4.5	RCP 8.5
H _s diseño [m]	3.40	3.48	H _s diseño [m]	3.40	3.48
Nivel de diseño [m]	4.08	4.18	Nivel de diseño [m]	4.08	4.18
ρ _r [Kg/m ³]	2700	2700	ρ _r [Kg/m ³]	2700	2700
ρ _a [Kg/m ³]	1025	1025	ρ _a [Kg/m ³]	1025	1025
K _D	2	2	K _D	2	2
α	0.46	0.46	α	0.59	0.59
cotg α	2.00	2.00	cotg α	1.50	1.50
tan α	0.50	0.50	tan α	0.67	0.67
Ts [s]	15.56	15.82	Ts [s]	15.56	15.82
Tm [s]	12.97	13.18	Tm [s]	12.97	13.18
Lom [m]	262.57	271.36	Lom [m]	262.57	271.36
Sm	0.01	0.01	Sm	0.01	0.01
S	2	2	S	2	2
P	0.4	0.4	P	0.4	0.4
Nz	7500	7500	Nz	7500	7500
ξm	4.39	4.41	ξm	5.86	5.88
ξmc	3.77	3.77	ξmc	4.42	4.42
W50 Hudson [Tn]	6.08	6.54	W50 Hudson [Tn]	8.11	8.72
Dn50 Hudson [m]	1.31	1.34	Dn50 Hudson [m]	1.44	1.48
W50 Van der Meer [Tn]	9.77	10.45	W50 Van der Meer [Tn]	10.65	11.39
Dn50 Van der Meer [m]	1.54	1.57	Dn50 Van der Meer [m]	1.58	1.62
W50 promedio coraza [Tn]	7.93	8.49	W50 promedio coraza [Tn]	9.38	10.05
Dn50 promedio coraza [m]	1.43	1.47	Dn50 promedio coraza [m]	1.51	1.55
W50 filtro [Tn]	0.79	0.85	W50 filtro [Tn]	0.94	1.01
Dn50 filtro [m]	0.66	0.68	Dn50 filtro [m]	0.70	0.72
W50 núcleo [Tn]	0.04	0.04	W50 núcleo [Tn]	0.05	0.05
Dn50 núcleo [m]	0.24	0.25	Dn50 núcleo [m]	0.26	0.27
Ancho berma [m]	3.99	4.08	Ancho berma [m]	4.22	4.32
Largo berma [m]	2.66	2.72	Largo berma [m]	2.81	2.88
Rc [m]	3.34	3.44	Rc [m]	3.34	3.44
Cota de coronamiento [m]	7.42	7.62	Cota de coronamiento [m]	7.42	7.62

La Ilustración 59 presenta los pesos de los elementos de coraza que conforman los rompeolas diseñados bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo (2081-2100) para taludes 1:1.5 y 1:2.

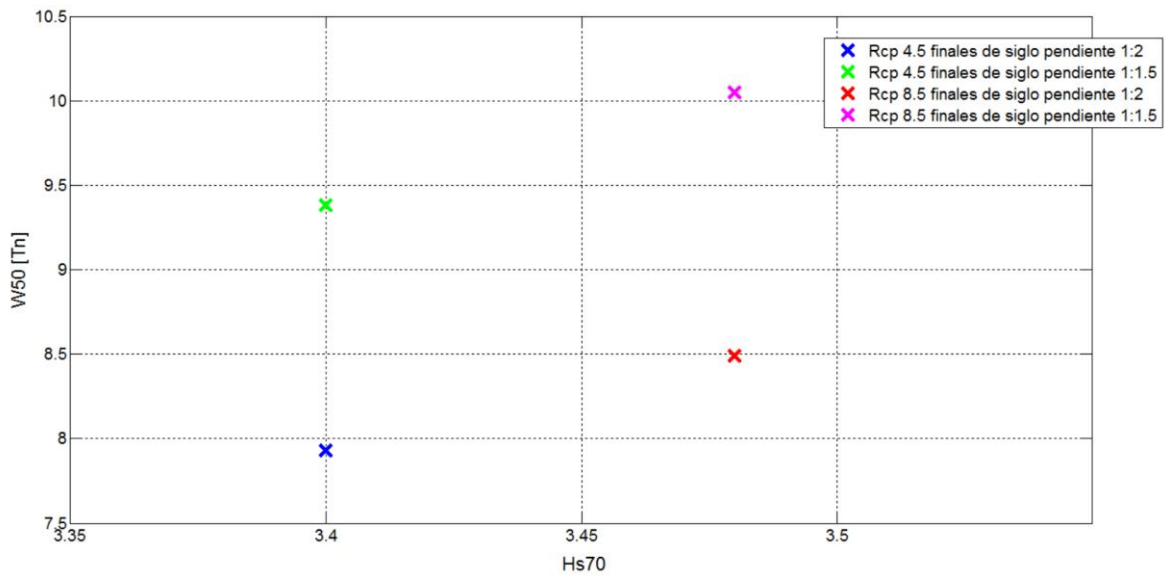


Ilustración 59: Comparación de diseños rompeolas con distintos taludes para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo.

Como se aprecia en la Ilustración 58 e Ilustración 59 el peso de los elementos de coraza presentes en un rompeolas aumentan notoriamente entre aquellos diseñados con un talud 1:2 de aquellos diseñados con un talud 1:1.5. De esta forma, el peso de los elementos de coraza del rompeolas diseñado bajo el escenario RCP 4.5 de mediados de siglo con talud 1:1.5 es un 18.08% superior al diseño con talud 1:2 y existe un aumento del 18.41% entre el peso de los elementos de coraza del rompeolas diseñado bajo el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo con talud 1:2 con respecto al talud 1:1.5. En relación al rompeolas diseñado bajo el escenario RCP 4.5 de finales de siglo existe un aumento en los pesos de los elementos de coraza del 18.28% entre el talud 1:2 y 1:1.5 y un aumento del 18.37% en los pesos de los elementos del rompeolas diseñado bajo el escenario RCP 8.5 de finales de siglo entre taludes 1:2 y 1:1.5.

En la actualidad el rompeolas en el tramo Sur de Avenida Perú posee una pendiente de 58%, lo que equivale aproximadamente a una pendiente 1:1.9, el tramo central tiene una pendiente de 50% (aproximadamente 1:2) y el tramo Norte una pendiente de 45% (1:2.4 aproximadamente) (INH, 2016). Con la finalidad de mantener una pendiente similar a la que posee actualmente el rompeolas de Avenida Perú y seleccionando la menor pendiente entre 1:1.5 y 1:2, como sugiere Losada (2012), se escoge una pendiente de 1:2 para los rompeolas diseñados bajo los cuatro escenarios RCP. En la Tabla 26 e Ilustración 60 se presenta el diseño final de los rompeolas para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados y finales de siglo.

Tabla 26: Diseño de los rompeolas con talud 1:2 de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales y mediados de siglo.

	RCP 4.5 mediados de siglo	RCP 8.5 mediados de siglo	RCP 4.5 finales de siglo	RCP 8.5 finales de siglo
H _s diseño [m]	3.14	3.33	3.40	3.48
W50 coraza [Tn]	6.36	7.44	7.93	8.49
Dn50 coraza [m]	1.33	1.40	1.43	1.47
W50 filtro [Tn]	0.64	0.74	0.79	0.85
Dn50 filtro [m]	0.62	0.65	0.66	0.68
W50 núcleo [Tn]	0.03	0.04	0.04	0.04
Dn50 núcleo [m]	0.23	0.24	0.24	0.25
Ancho de berma [m]	3.70	3.91	3.99	4.08
Largo de berma [m]	2.47	2.60	2.66	2.72
Rc [m]	3.02	3.26	3.34	3.44
Cota de coronamiento [m]	6.83	7.25	7.42	7.62

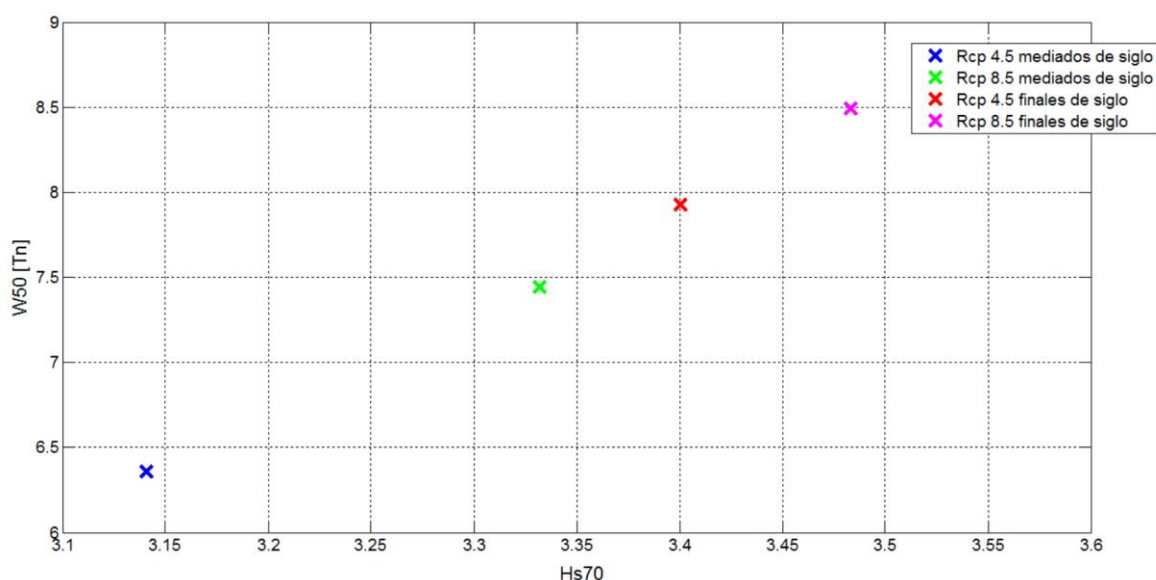


Ilustración 60: Comparación de los pesos de los elementos de coraza de los rompeolas con talud 1:2 diseñados bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de final y mediados de siglo.

Como se observa en la Ilustración 60, el peso de los elementos de coraza que componen los rompeolas varía considerablemente dependiendo del escenario bajo el cual se está diseñando. Existe una variación del 24.69% entre el peso de los elementos de coraza del rompeolas para el escenario RCP 4.5 de mediados de siglo con el de finales de siglo, y un 14.11% de aumento entre el peso de los elementos de coraza del rompeolas diseñado bajo el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo en relación al diseño realizado bajo el escenario RCP 8.5 de finales de siglo.

En la actualidad la defensa costera que se encuentra en Avenida Perú corresponde a un rompeolas en talud compuesto de dos capas (coraza y núcleo), cuyos elementos poseen pesos que varían entre las 0.4 y las 7.9 [Tn]. En la Tabla 27 se presentan los pesos de los elementos que conforman la defensa costera de Avenida Perú en el presente.

Tabla 27: Pesos actuales [Tn] de los elementos presentes en rompeolas de Avenida Perú.

Tramo Avenida Perú					
Sur		Centro		Norte	
Rocas pequeñas	Rocas grandes	Rocas pequeñas	Rocas grandes	Rocas pequeñas	Rocas grandes
0.40	4.00	0.20	1.90	0.30	2.10
	6.50*	0.30	2.00	0.50	5.10
	7.90*	0.60	4.00	0.90	5.70*
		0.30	4.70*		
		0.80			

* Rocas ubicadas junto al muro que separa el enrocado y la vereda de Avenida Perú.

Fuente: (Beyá *et al.*, 2016).

Los mayores pesos que poseen los elementos de la defensa costera actual no se encuentran en el talud del rompeolas, sino que están adosados al muro que separa los enrocados con la vereda de Avenida Perú. Los elementos que se encuentran en el talud del rompeolas tienen pesos que van desde las 0.4 a las 5 [Tn] y se distribuyen como se detalla a continuación (Beyá *et al.*, 2016):

- El tramo Sur posee rocas que van desde las 0.4 a las 4 [Tn]. La cota de coronamiento está a 6.7 [m] con respecto al NRS.
- El tramo central posee rocas cuyos pesos van desde las 0.2 a las 2 [Tn]. La cota de coronamiento se encuentra a 5.8 [m] con respecto al NRS.
- El tramo Norte se compone de rocas cuyos pesos varían entre las 0.3 a las 5 [Tn]. La cota de coronamiento se encuentra a 6.0 [m] con respecto al NRS.

Los pesos de los elementos de coraza calculados bajo el escenario RCP 4.5 de mediados de siglo (2026-2045) son 1% mayores a los actuales (considerando los pesos actuales como el promedio de los pesos que actualmente componen la coraza del rompeolas, es decir entre 4.7 a 7.9 [Tn], promediando 6.3 [Tn]) y existe un aumento del 18.1% entre los pesos de los elementos de coraza calculados bajo el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo con relación a los pesos actuales. En cuanto a los pesos calculados bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo (2081-2100) existe un aumento de 25.87 y de 34.76% con relación a los pesos actuales, respectivamente.

Las cotas de coronamiento calculadas para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados de siglo es un 10.88 y un 17.69% superiores a la cota de coronamiento promedio actual (6.16 [m] NRS), respectivamente. Y existe un aumento del 20.45 y del 23.7% entre las cotas de coronamiento calculadas bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de finales de siglo en relación a la cota de coronamiento actual, respectivamente.

5.1.3 COSTOS DE LOS ROMPEOLAS EN TALUD

Mediante la empresa SERVICIOS ESIGMA LTDA. se obtuvieron los valores de diferentes pesajes de rocas, los cuales son detallados a continuación:

- Roca de 2 a 40 [Kg] : \$27.600/ m³ + IVA
- Roca de 550 a 900 [Kg] : \$24.900/ m³ + IVA
- Roca de 5.5 a 9.0 [Tn] : \$28.800/ m³ + IVA

Los valores descritos con anterioridad incluyen transporte, pero no colocación de rocas. La roca es extraída desde cantera ubicada en zona de San Pedro, Quillota.

Si se considera el rompeolas en talud del escenario RCP 4.5 de mediados de siglo el costo en roca será de \$2.495.444.079 y el costo del rompeolas del escenario RCP 8.5 de mediados de siglo de \$2.800.722.393. En cuanto a los costos de los rompeolas de finales de siglo de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 estos son de \$3.022.598.844 y de \$3.031.676.004, respectivamente.

5.1.4 PLANOS DE LOS ROMPEOLAS EN TALUD

Desde la Ilustración 61 a la Ilustración 64 se presentan planos de los rompeolas diseñados bajo los cuatro escenarios RCP considerados.

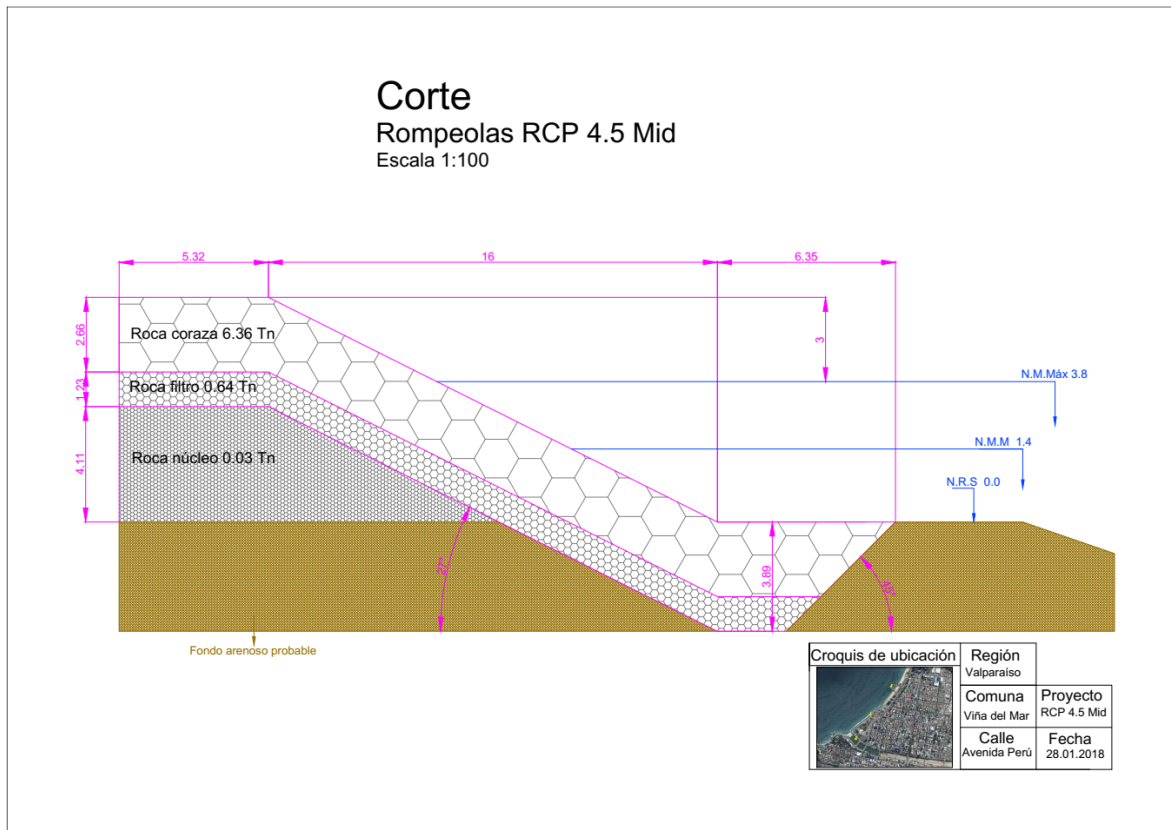


Ilustración 61: Plano rompeolas en talud escenario RCP 4.5 de mediados de siglo.

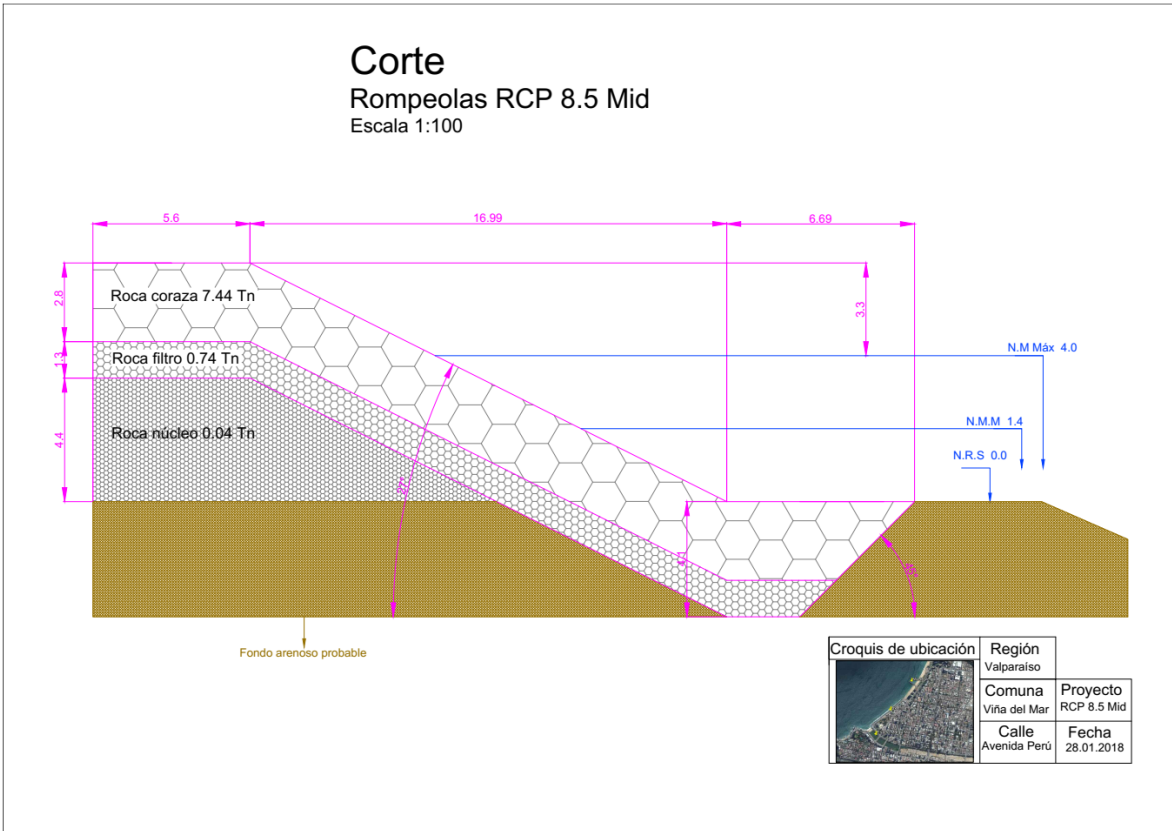
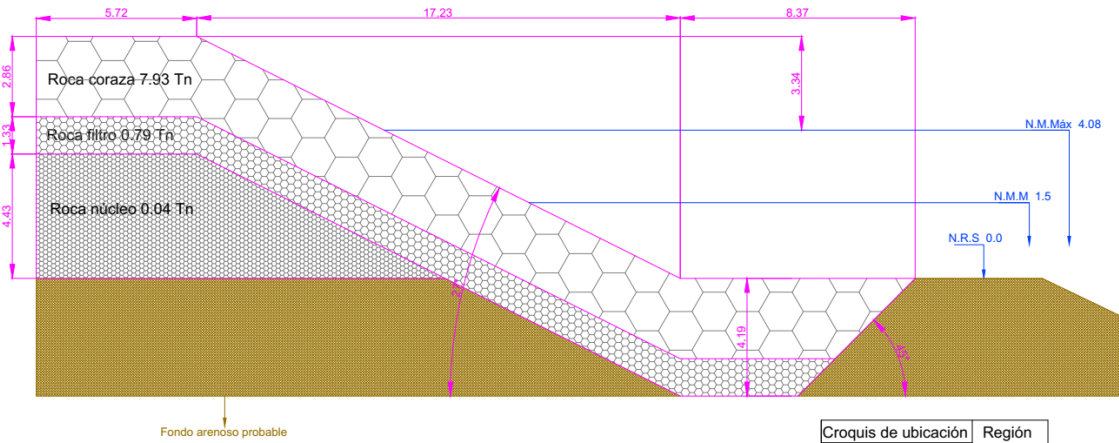


Ilustración 62: Plano rompeolas en talud escenario RCP 8.5 de mediados de siglo.

Corte

Rompeolas RCP 4.5 End

Escala 1:100



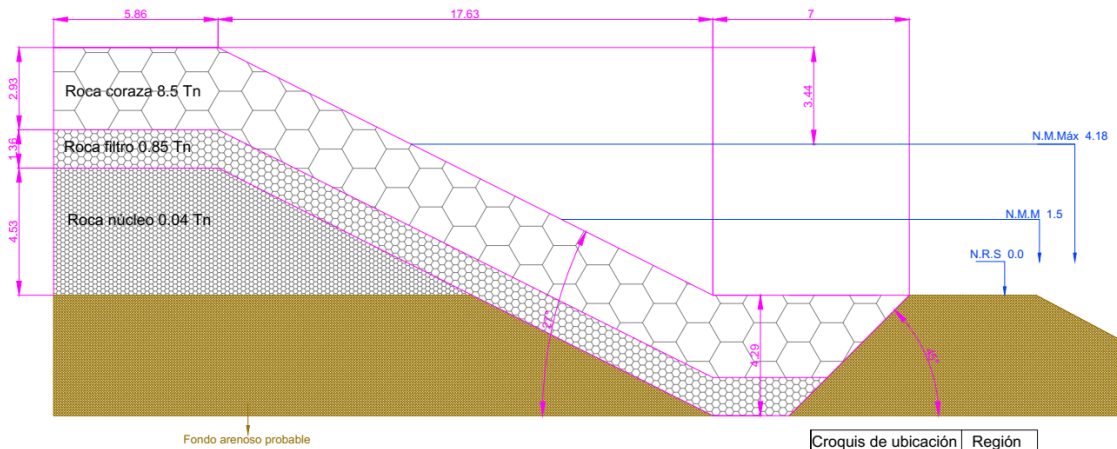
Croquis de ubicación 	Región	Valparaíso
	Comuna	Viña del Mar
	Proyecto	RCP 4.5 End
	Calle	Avenida Perú
	Fecha	28.01.2018

Ilustración 63: Plano rompeolas en talud escenario RCP 4.5 de finales de siglo.

Corte

Rompeolas RCP 8.5 End

Escala 1:100



Fondo arenoso probable

	Región	Valparaíso
	Comuna	Viña del Mar
	Proyecto	RCP 8.5 End
	Calle	Avenida Perú
	Fecha	28.01.2018

Ilustración 64: Plano rompeolas en talud escenario RCP 8.5 de finales de siglo.

6 DISCUSIONES

Este trabajo tuvo como objetivo determinar la influencia que el cambio climático tendrá en los pesos y longitudes equivalentes de los elementos que componen un rompeolas en talud.

De los resultados del análisis de clima medio del set de datos históricos y los cuatro sets de proyecciones para los escenarios RCP se puede deducir que existe una tendencia al aumento en los parámetros promedio mensual de la altura significativa y los periodos *peak*. En cuanto a las direcciones promedio mensual se presenta una desviación hacia el Sur. Esto queda de manifiesto desde la Ilustración 41 a la Ilustración 45 y de forma más explícita desde la Tabla 43 a la Tabla 52 presentes en anexos.

La variación que experimentará la altura significativa promedio para el año horizonte 2045, en el escenario RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados de siglo será de un aumento de 0.008 [m/año]. Este valor es muy similar al encontrado por Cofré y Beyá (2016), el cual es de 0.009 [m/año], para el mismo año horizonte. Los mismos autores identificaron que la variación de la altura significativa para el periodo 2005 - 2045 será de entre 0.003 y 0.01 [m/año], mientras que el presente trabajo obtuvo una variación de 0.014 [m/año] para el escenario RCP 4.5 de mediados de siglo, y de 0.015 [m/año] para el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo, ambos valores calculados para el periodo 2005 - 2045. Las diferencias entre Cofré y Beyá (2016) y la presente memoria de proyecto de título se pueden deber a la utilización de diferentes sets de datos históricos para la obtención de la variación de la altura significativa, ya que dichos autores utilizan la base de datos AOC1 generada por el proyecto FONDEF-IDeA IT3I20006 “Un atlas de oleaje para Chile”¹³ con una ventana temporal desde 1980 hasta 2015. En la presente memoria de proyecto de título se utiliza la base de datos del Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) en el periodo 1979 - 2009.

Molina (2011) obtuvo una variación en la altura significativa promedio de 0.22 [m] (0.01 [m/año]) para el periodo 2006-2031. Ese valor es muy similar al encontrado en el presente trabajo de 0.27 [m] (0.01 [m/año]) para el escenario RCP 4.5 de mediados de siglo, y de 0.23 [m] (0.01 [m/año]) para el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo; ambos valores calculados para el mismo periodo de tiempo. El mismo autor estima una variación de entre 0.003 y 0.006 [m/año] para el periodo 2011- 2031, mientras que los resultados de esta memoria de proyecto de título son de 0.008 [m/año] para el escenario RCP 4.5 de mediados de siglo y de 0.006 [m/año] para el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo; valores calculados para el periodo 2009 - 2031.

Por otra parte, CEPAL (2015) estima una variación en la altura significativa promedio de 0.11 [m] (0.004 [m/año]) para el año horizonte 2040, valor muy inferior al encontrado en esta memoria de proyecto de título, 0.63 [m] (0.02 [m/año]), para el mismo año horizonte. Para el periodo 2010 - 2070, CEPAL (2015) calcula una variación entre 0.002 y 0.006 [m/año], mientras que los resultados de este trabajo son de 0.009 y 0.007 [m/año] para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 en el periodo 2009 - 2081, respectivamente. Para el periodo 2009 - 2100 se encontraron variaciones de 0.007 y de 0.005 [m/año] para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, respectivamente.

¹³ Documentación del proyecto en <http://www.oleaje.uv.cl/>

En la Ilustración 65 e Ilustración 66 se presentan alturas significativas históricas y proyectadas por diversos autores. Se debe tener en consideración que los diferentes autores utilizaron diversas técnicas para calcular, tanto la altura significativa histórica como la proyectada. De esta forma en la Ilustración 65 Molina (2011) presenta el promedio mensual de la altura significativa de la base de datos obtenida mediante el modelo de *hindcasting* WAM (Wave Model); el nodo graficado es representativo de la IV Región Coquimbo. En la misma ilustración Cofré y Beyá (2016) obtuvieron la altura significativa promedio interanual de la base de datos AOC1 generada por el proyecto FONDEF-IDeA IT3I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile”; el nodo graficado en la Ilustración 65 es representativo de Valparaíso. Por otra parte, la altura significativa histórica encontrada por Martínez *et al.* (2017) corresponde a los promedios mensuales y son representativos de Valparaíso. El resultado de la altura significativa histórica de esta memoria de proyecto de título graficado en la Ilustración 65 corresponde a los promedios anuales de la base de datos perteneciente al Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) desarrollado por Centers for Environmental Prediction (NCEP) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

La Ilustración 66 presenta la proyección de la altura significativa de Molina (2011) para el año horizonte 2031 calculada mediante una tendencia lineal de la serie histórica de parámetros de oleaje, tendencia que es representativa de la IV Región de Chile. Cofré y Beyá (2016) obtuvieron proyecciones de la base de datos de AOC1 extrapolando rectas ajustadas y proyecciones de la base de datos generada a partir de los MCG, las que corresponden a promedios interanuales con corrección de sesgo¹⁴. Ambas proyecciones son representativas de la V Región Valparaíso. En cuanto a los resultados de esta memoria de proyecto de título, expuestos en la Ilustración 66, estos corresponden a los promedios anuales de los cuatro sets de proyecciones.

Comparación de Hs [m] históricas de distintos autores.

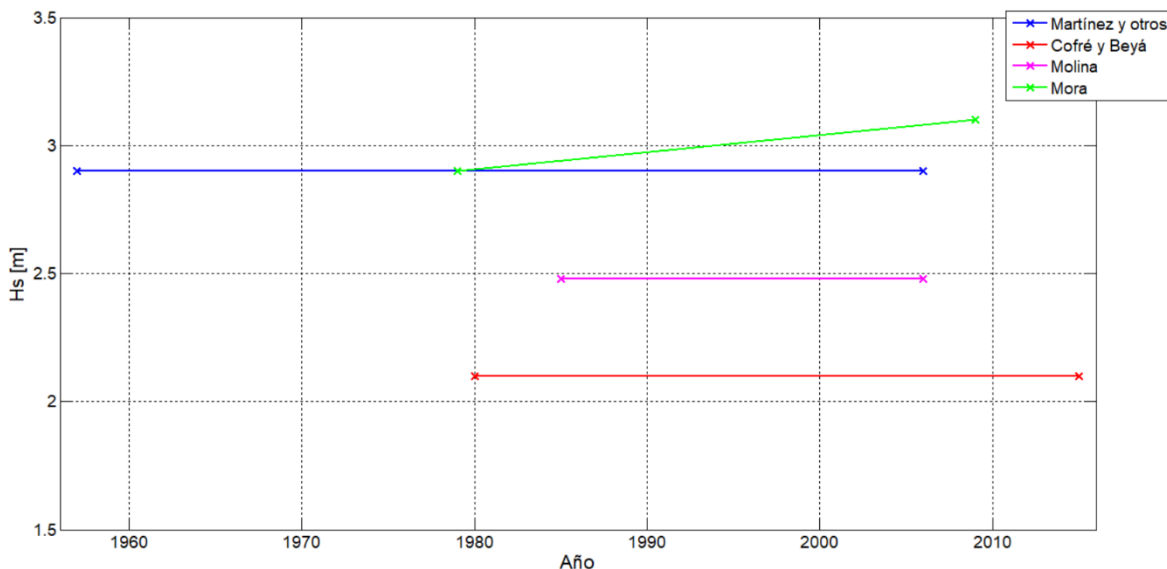


Ilustración 65: Comparación de Hs [m] históricas de distintos autores.

¹⁴ Para más detalle sobre el cálculo de las proyecciones revisar (Cofré & Beyá, 2016).

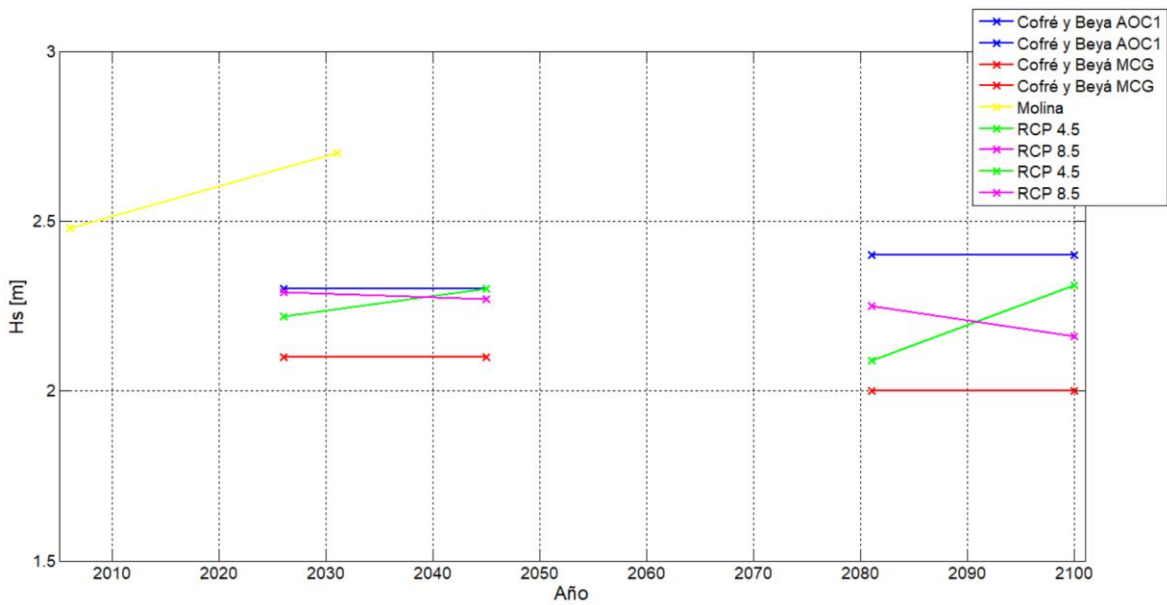


Ilustración 66: Comparación de Hs [m] proyectadas de distintos autores.

Las diferencias que se presentan en el parámetro de altura significativa entre aguas profundas y las propagaciones hasta los 10 [m] de profundidad en todos los escenarios RCP se debe al gran contraste que existe entre los distintos coeficientes de agitación, un ejemplo de esto se detalla a continuación.

Si los promedios anuales (1979) de los parámetros de altura de ola en aguas profundas es de 2.89 [m], el del periodo *peak* es de 13.30 [s] y el de la dirección *peak* es de 226.23°, el coeficiente de agitación resulta ser de 0.067. Si la altura significativa histórica es calculada, mediante la ecuación (10), esta resulta ser de 0.194 [m].

$$(10) \quad K_{A \text{ histórica}} * H_o \text{ histórica} = H_S \text{ histórica}$$

Mientras que en el escenario RCP 4.5 de finales de siglo el promedio anual (2100) de la altura de ola en aguas profundas es de 2.08 [m], el periodo *peak* es de 14.54 [s] y la dirección *peak* es de 260.61°, el coeficiente de agitación resulta ser de 0.667. Si se calcula la altura significativa, mediante la ecuación (11), esta resulta ser de 1.39 [m].

$$(11) \quad K_{A \text{ 2045}} * H_o \text{ 2045} = H_S \text{ 2045}$$

Se debe tener en consideración que las variaciones entre el promedio anual de la altura significativa histórica con la proyectada para el escenario RCP 4.5 de finales de siglo se deben no solo a las diferencias entre los coeficientes de agitación, sino también a que se están comparando distintas estadísticas, lo que implica una fuente de error.

En cuanto a los resultados del análisis de clima extremo para los distintos escenarios RCP se desprende que las alturas significativas con periodos de retorno de 70 años (H_{S70})

experimentarán un aumento debido al fenómeno de cambio climático. En la Ilustración 67 se presentan los valores de alturas significativas con periodo de retorno de 50 años (H_{50}) calculadas en esta memoria de proyecto de título y las obtenidas por Cofré & Beyá (2016). En la Ilustración 68 se presentan las H_{50} históricas y proyectadas, conseguidas en este trabajo, con un intervalo de confianza del 90% y las H_{50} calculadas por Cofré & Beyá (2016) con sus respectivos errores relativos. Se debe tener en consideración que para el cálculo de H_{50} histórica Cofré & Beyá (2016) utilizaron una base de datos diferente a la empleada en este trabajo. Con respecto a las proyecciones si bien se utilizaron las mismas bases de datos de proyecciones, en este trabajo el análisis de clima extremo se llevó a cabo seleccionando las tormentas en aguas profundas, en cuanto a la metodología utilizada por Cofré & Beyá (2016) se desconoce.



Ilustración 67: Comparación valores extremos.

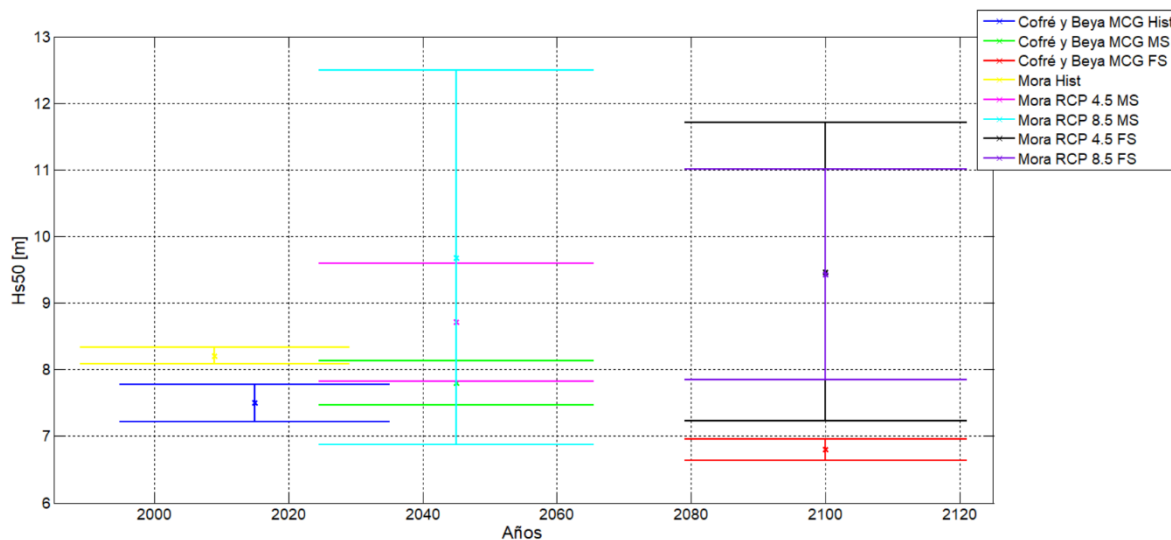


Ilustración 68: Comparación valores extremos con intervalos de confianza.

7 RECOMENDACIONES

Es imprescindible la inserción de códigos y prácticas de edificación que contemplen los posibles efectos del cambio climático. Junto con esto, se debe ampliar la visión de medidas de adaptación basada en ecosistemas (restauración de humedales o deltas y restauración de ecosistemas costeros, entre otras) las cuales pueden ser más económicas y sostenibles que los enfoques de protección artificial. Existe evidencia que el uso de medidas de adaptación basadas en ecosistemas puede reducir o retrasar la necesidad de medidas de adaptación ingenieriles (Field *et al.*, 2014).

Se requiere de financiamiento para mejorar y aumentar el monitoreo de variables climáticas y ambientales. En la actualidad la información disponible, tanto histórica como futura, es escasa y su resolución es insuficiente para establecer estrategias de adaptación para la infraestructura marítima y costera del país. Las instituciones que realizan monitoreo de algunos parámetros meteoceanográficos para la investigación científica no están orientadas al estudio sistemático del cambio climático, sino que sirven principalmente a la agricultura, la minería, la pesca y acuicultura y la navegación marítima y aérea (PNUD, 2016).

Es necesario el aumento de recursos humanos y económicos que estén capacitados en los temas de adaptación al cambio climático, con la finalidad de desarrollar investigación orientada a la generación de escenarios climáticos regionales y proyectos de adaptación al cambio climático (Gobierno de Chile, 2016).

La presente memoria de proyecto de título corresponde a una investigación que aproxima el impacto que tendrá el cambio climático en Chile. Para estudios futuros se recomienda:

- Generar escenarios de cambio climático para el país, ya que los escenarios utilizados en este trabajo son a nivel global y no poseen la suficiente precisión para cuantificar de forma más exacta la influencia que tendrá el cambio climático en el futuro. Si bien CEPAL y el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (en adelante IH Cantabria) han realizado un esfuerzo por cuantificar el impacto del cambio climático para América Latina, el informe que expone dichos impactos fue elaborado el año 2012 y no considera los nuevos escenarios RCP publicados por el IPCC en el año 2013.
- Realizar análisis de marea armónica que contemple un registro de desnivelaciones con mayor tiempo de duración. En la presente memoria de proyecto de título se realiza dicho análisis solo para un mes de registro.
- Realizar el diseño de rompeolas mediante una técnica probabilística, a modo de incorporar parámetros que no fueron incluidos en este trabajo. Entre estos parámetros se pueden mencionar la duración de los temporales y el periodo real del oleaje.
- Realizar el cálculo del número de olas (N_z), ya que en esta memoria de proyecto de título se consideró un criterio conservador utilizando como número de olas 7500, lo que equivale a una duración de las tormentas de 27 [h] aproximadamente. Si bien

el número de olas utilizado no es frecuente dentro de los registros de Valparaíso, si ha ocurrido con anterioridad una duración de los eventos extremos con esa longitud de tiempo, lo cual puede ser apreciado en la Ilustración 69.

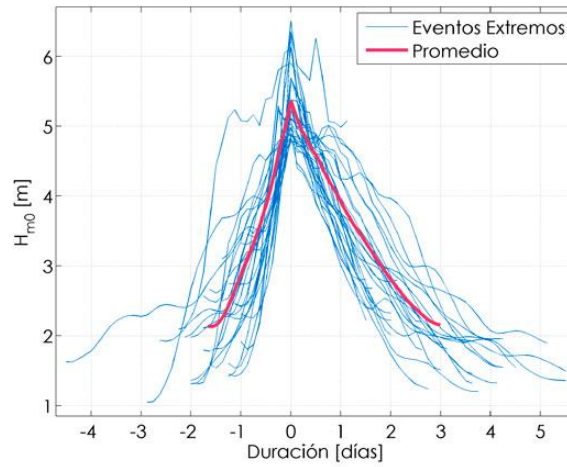


Ilustración 69: Serie de tiempo de extremos.

Fuente: (Beyá *et al.*, 2016).

- Realizar el cálculo de la altura significativa de diseño considerando las probabilidades conjuntas de la marea armónica, meteorológica y el *wave setup*.

8 CONCLUSIONES

Del presente proyecto de título surgen las siguientes conclusiones:

Relativo al cambio climático, se concluye:

Los efectos del cambio climático en Chile ya están ocurriendo. Un claro ejemplo de esto es lo ocurrido en el año 2016 donde las temperaturas del océano generaron un brote de algas que provocó la pérdida del 12% de la producción anual de salmones. En enero de 2017, en Santiago, se registraron las temperaturas más altas en 100 años, las que provocaron una temporada de incendios forestales de las que no se tiene precedentes, afectando a 597.000 hectáreas (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). Debido a esto es primordial tomar las medidas necesarias para disminuir los impactos del fenómeno de cambio climático, anticiparse a los potenciales daños y minimizar las amenazas que estos daños producirán al progreso económico y social, a la infraestructura, a la seguridad energética, a la salud humana y a los ecosistemas nacionales. El cambio climático no solo afecta a las áreas antes mencionadas, también al ámbito político. La visión que poseen los países en desarrollo es que la crisis ambiental que se vive actualmente es debida a una histórica asimetría en el crecimiento, tanto humano como económico, en la cual los países desarrollados lograron su alto estándar de vida gracias a un sistema altamente contaminante y depredador de recursos naturales, recursos que fueron, y aun son, obtenidos de países en desarrollo (Estenssoro, 2010).

Se debe tener en consideración que las proyecciones climáticas, independiente de los modelos de forzamiento utilizados para realizarlas, tienen asociado un grado de incerteza. El primer nivel de incerteza o incertidumbre tiene relación con las proyecciones de emisiones futuras de los GEI, las cuales se basan en supuestos del crecimiento de la población, la economía, las tecnologías, el tipo de energía y las futuras políticas de cambio climático, además de la transformación de las emisiones a concentraciones atmosféricas y sus efectos radiativos. El segundo nivel de incerteza tiene relación con la respuesta climática de los GCMs. Esta incerteza se genera debido a la sensibilidad de los distintos modelos a los forzantes naturales, sumada a las distintas capacidades de los modelos en representar las características climáticas. Un último nivel de incertidumbre se incluye al integrar técnicas de *downscaling* a las proyecciones proporcionadas por los GCMs. Este nivel de incertidumbre tiene diversas fuentes, entre las cuales se encuentran las diferencias en los resultados debido a la utilización de distintos métodos, o distintos modelos regionales y fallas en la representación de los procesos físicos. Otra de las fuentes de incerteza en este nivel son los datos históricos utilizados, los cuales pueden ser insuficientes debido a la falta de estaciones meteorológicas en el sitio de interés o poseer una mala calidad (Vicuña *et al.*, 2014).

Relativo a adaptación en Chile, se concluye:

Las obras de infraestructura son un pilar fundamental en el funcionamiento y desarrollo de diversos sectores económicos y sociales, por lo que es imperante dar relevancia a la adaptación al cambio climático en la infraestructura. Se debe tener presente que las medidas de adaptación traen aparejada una disminución en el daño inevitable que los impactos del cambio climático tendrán.

Si bien se han hecho numerosos esfuerzos globales para reducir las emisiones de GEI para desacelerar el cambio climático, los efectos de la mitigación no serán visibles antes de la segunda mitad del siglo XXI, por lo que es necesario contar con estrategias de adaptación (Ministerio del Medio Ambiente, 2017). En la actualidad, el proceso de planificación de obras de infraestructura del MOP no considera el cambio climático ni medidas de adaptación para hacer frente a este fenómeno (Vicuña *et al.*, 2013) y el plan sectorial de infraestructura se encuentra en fase de desarrollo, y está programado para el periodo del Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022. Es importante que las medidas de adaptación que se lleven a cabo incluyan procesos de supervisión y aprendizaje, con la finalidad que la adaptación sea eficaz (Field *et al.*, 2014).

Hoy en día el país carece de herramientas normativas para proveer el financiamiento de las necesidades concretas en adaptación al cambio climático. En la Estrategia Nacional de Cambio Climático de Chile se reconoce que *“Los costos de la inacción pueden ser mucho mayores que las medidas e inversiones necesarias, en corto plazo, para adaptarse y mitigar los impactos negativos del cambio climático. El Estado de Chile, en quien recaerá la mayor carga de inversión, sobre todo en el desarrollo de infraestructura, debe destinar los recursos necesarios para evaluar tales costos y determinar las acciones a seguir, en particular, en aquellos sectores que se consideren prioritarios”* (Departamento de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente, 2014, pág. 19). Chile ya reconoce la importancia de generar acciones de adaptación; es momento de proponer dichas acciones y llevarlas a cabo.

Relativo al diseño de obras marítimas o costeras, se concluye:

El diseño de las obras marítimas en Chile se enfrenta con al menos tres elementos que dificultan su proceso. El primero corresponde a la insuficiente cobertura espacio-temporal de registros de oleaje los cuales permitirían complementar los datos utilizados para el cálculo de eventos extremos. El segundo elemento tiene relación con que las bases de datos utilizadas para la determinación de tormentas de diseño no incluyen algunos eventos extremos que han sido observados en el último tiempo y que se espera que aumenten tanto en su frecuencia como en su intensidad. El último elemento es la necesidad de examinar las metodologías utilizadas actualmente para la definición de eventos extremos de diseño, ya que la evidencia expone que en los últimos años algunas obras de infraestructura han sido solicitadas por climas de oleaje poco comunes, los que no pudieron ser correctamente anticipados (Vicuña *et al.*, 2014).

Relativo al set de datos históricos y a los cuatro sets de proyecciones para los distintos escenarios RCP en aguas profundas, se concluye:

Existe una tendencia a la disminución de las alturas significativas en aguas profundas debido al fenómeno de cambio climático. Dicha tendencia se presenta en los cuatro sets de proyecciones. Sin embargo, los periodos *peak* muestran una tendencia al aumento y las direcciones presentan una mayor dispersión exhibiendo olas desde el Norte y Noroeste, lo que implica un oleaje que incide de forma más directa al sitio de estudio y por ende una mayor exposición del mismo, debido a que la bahía de Valparaíso está orientada hacia el Norte, estando protegida del oleaje proveniente del Sur, pero expuesta al oleaje del Norte.

Las tendencias en los parámetros de altura significativa y periodos peak se pueden deber al desplazamiento que está experimentando el anticiclón del océano Pacífico Sur en la costa de Chile (Minetti, 2007).

Relativo al análisis de clima medio del set de datos históricos y a los cuatro sets de proyecciones para los distintos escenarios RCP, se concluye:

El escenario RCP 4.5 de mediados de siglo presenta variaciones similares a las resultantes para el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo para el parámetro de la altura significativa promedio anual. Para finales de siglo (2100) se presentan mayores aumentos de altura significativa promedio anual en el escenario RCP 4.5 que en el escenario RCP 8.5 de finales de siglo. Sin embargo, en el año horizonte 2081 se presentan mayores valores de la altura significativa promedio anual en el escenario RCP 8.5 que en el escenario RCP 4.5. El parámetro de periodo *peak* promedio anual en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados y finales de siglo presenta aumentos en torno a los 1.6 [s] en relación a los valores actuales. En cuanto a las direcciones del oleaje se presenta un desplazamiento hacia el Sur en los cuatro escenarios RCP en comparación con las direcciones actuales; el desplazamiento es de aproximadamente -27° en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo y de -26.7° en los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo.

Relativo al análisis de clima extremo para los distintos escenarios RCP se concluye:

Las alturas significativas con periodos de retorno de 70 años (H_{s70}) experimentarán un aumento debido al fenómeno de cambio climático. Del análisis de clima extremo se desprende que entre la H_{s70} histórica y la H_{s70} del escenario RCP 4.5 de mediados de siglo (2026-2045) existe un aumento del 5.9%. Si se compara H_{s70} histórica con la del escenario RCP 8.5 de mediados de siglo existe un aumento de 15.7%. Si la comparación es entre la H_{s70} histórica con la H_{s70} de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo (2081-2100) el aumento es de 17.1 y 20.2%, respectivamente.

Los distintos escenarios RCP también conducen a diferencias entre las H_{s70} , lo cual es esperable, ya que se está analizando un escenario RCP de estabilización del forzamiento radiativo (RCP 4.5) con otro, en el cual el forzamiento radiativo sigue aumentando después del año 2100 (RCP 8.5). Si se compara la H_{s70} del escenario RCP 4.5 con la del escenario RCP 8.5 de mediados de siglo la diferencia es de 9.2%. El aumento entre la H_{s70} del escenario RCP 4.5 con la del escenario RCP 8.5 de finales de siglo es de 2.6%.

Relativo al diseño de rompeolas en talud para los distintos escenarios RCP se concluye:

La hipótesis de esta memoria de proyecto de título se verifica. Es decir, el cambio climático conlleva a que el peso de los elementos dispuestos en la defensa costera de Avenida Perú, deben aumentar con la finalidad de disminuir la exposición de esta frente a las nuevas condiciones climáticas que traerá el cambio climático.

Si se compara el peso actual de los elementos de coraza que componen el rompeolas de Avenida Perú (6.3 [Tn]) con los pesos estimados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados de siglo (2026-2045) existe un aumento del 1% y del 18.1%, respectivamente.

Existe un aumento de 25.87% si se compara el peso actual de los elementos de coraza con el peso calculado bajo el escenario RCP 4.5 de finales de siglo (2081-2100) y un aumento del 34.76% si se compara el peso actual con el peso estimado bajo el escenario RCP 8.5 de finales de siglo.

Entre los escenarios RCP también existen diferencias. Si se compara el peso de los elementos de coraza que componen el rompeolas en talud diseñado bajo el escenario RCP 4.5 de mediados de siglo con el peso estimado bajo el escenario RCP 4.5 de finales de siglo existe un aumento del 24.69% en este último. Si la comparación es entre el peso de los elementos de coraza del rompeolas diseñado bajo el escenario RCP 8.5 de mediados de siglo con el peso calculado bajo el escenario RCP 8.5 de finales de siglo existe un aumento de 14.11%.

En cuanto a las cotas de coronamiento existe un aumento de 10.88 y de 17.69% entre la cota actual (6.16 [m] NRS) y las cotas estimadas bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados de siglo, respectivamente. Un aumento de 20.45 y de 23.70% si se compara la cota actual con la calculada bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de finales de siglo, respectivamente.

Los costos de los diversos rompeolas diseñados en esta memoria de proyecto de título varían entre cada uno de los escenarios RCP. De esta forma existe un aumento de \$527.154.765 entre el rompeolas del escenario RCP 4.5 de mediados de siglo con el de finales de siglo, considerando solo el costo de las rocas, un aumento de \$230.953.611 entre los rompeolas diseñados bajo los escenarios RCP 8.5 de mediados de siglo con el de finales de siglo. Si la comparación se realiza entre los rompeolas de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de mediados de siglo el aumento es de \$305.278.314 y existe un aumento de \$9.077.160 entre los rompeolas diseñados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 de finales de siglo.

De lo expresado en los párrafos anteriores se puede concluir que de no considerar los futuros efectos que tendrá el cambio climático en el desarrollo de una obra costera o si no se adapta la infraestructura existente, estas se expondrán a una disminución en su grado de seguridad.

9 GLOSARIO

Ajuste isostático glacial (GIA): Es el movimiento continuo que experimenta la tierra debido a la presión que ejercieron, hace millones de años, los glaciares durante la última edad de hielo. A pesar que el hielo se derritió hace mucho tiempo la corteza de la tierra que estaba abajo y alrededor del hielo sigue aumentando o disminuyendo como una reacción a la presión que antes tenía (NOAA, 2015).

Albedo: Fracción de radiación solar reflejada por una superficie u objeto, usualmente expresada en porcentaje. En suelos cubiertos de nieve el albedo adopta valores mayores, mientras que en superficies cubiertas de vegetación y en los océanos el valor del albedo es menor. En general el albedo de la tierra varía en función de la nubosidad, de la nieve, del hielo de la superficie foliar (superficie de las hojas expuestas a la radiación solar) y de la cubierta del suelo (Stocker *et al.*, 2013).

Altura de ola significativa superada 12 horas al año (H_s12): representa la altura significativa con probabilidad de exceder a la media 12 horas al año. Esta altura de ola es utilizada en el estudio del perfil de equilibrio de las playas, ya que está relacionada con la profundidad a la que el transporte de sedimentos deja de estar dominado por el oleaje (CEPAL, 2015).

Anticiclón del océano Pacífico Sur: Sistema atmosférico de altas presiones que abarca gran parte del centro y norte de Chile, con una posición ubicada hacia el Norte en invierno y que alcanza su punto más austral en verano (Villaseñor, 2008).

Carbono negro: También es conocido como hollín, se refiere al “*elemento de un aerosol definido a efectos prácticos en términos de absorción de luz, de reactividad química y/o de estabilidad térmica*” (Stocker *et al.*, 2013).

Clatrato: “*Mezcla parcialmente congelada de gas metano y hielo, que suele estar presente en sedimentos*” (Stocker *et al.*, 2013).

Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC): Fue creada el 9 de mayo de 1992 en la ciudad de Nueva York, y entró en vigor en 1994. Su objetivo principal es “*la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático*” (Stocker *et al.*, 2013). Esta convención incluye a todos los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y a países de economías en transición.

Cuarto Informe de Evaluación (CIE): Se refiere al CIE del IPCC denominado “Cambio Climático 2007”. Este informe abarca las contribuciones realizadas por los tres grupos de trabajo del IPCC. El grupo I contribuyo con la información relacionada a “Los fundamentos físicos”, el grupo de trabajo II con “Impactos, adaptación y vulnerabilidad” y el grupo de trabajo III con información basada en “Mitigación del cambio climático”. Además, incluye datos científicos, técnicos y socioeconómicos útiles para la definición de políticas en relación con el cambio climático (IPCC, 2016).

Downscaling: Es un método que deriva información local o regional (10 a 100 km) desde modelos de gran escala. Existen dos métodos de *downscaling*: *downscaling* dinámico y *downscaling* empírico/estadístico. El primer método utiliza los resultados de modelos climáticos regionales, modelos globales con resolución espacial variable o modelos globales de gran resolución. El segundo método de *downscaling* desarrolla relaciones estadísticas que vincula las variables atmosféricas de gran escala con variables climáticas locales o regionales. En ambos casos, la calidad de los modelos impulsores permanece como una importante limitación sobre la calidad de la información obtenida desde los métodos de *dowscaling* (Stocker *et al.*, 2013).

El Niño-Oscilación del Sur (ENOS): Inicialmente ENOS se consideraba una corriente de aguas cálidas que circulaba periódicamente a través de la costa de Ecuador y Perú. Hoy se designa como un calentamiento de toda la cuenca del Océano Pacífico tropical. Este fenómeno está relacionado a una fluctuación de un patrón global de presiones en la superficie tropical y subtropical denominada Oscilación del Sur. Este es un fenómeno atmosfera-océano acoplado y su escala de tiempo más habitual abarca desde dos hasta aproximadamente siete años. Durante la presencia de ENOS los vientos alisios habituales se debilitan, reduciendo el flujo ascendente y alterando las corrientes oceánicas, con lo que aumenta la temperatura superficial del mar, debilitado a su vez los vientos alisios. Este fenómeno afecta considerablemente a los patrones de viento, de temperatura superficial del mar y de precipitación en el Pacífico tropical. Sus efectos influyen en el clima de toda la región del Pacífico y de muchas otras partes del mundo mediante teleconexiones en toda la extensión del planeta. La fase fría de ENOS se denomina La Niña (Stocker *et al.*, 2013).

Emisiones antropógenicas: Corresponden a las emisiones resultantes de las actividades de los seres humanos o producto de esta (Stocker *et al.*, 2013).

Emisiones compatibles: Los modelos que pueden simular el ciclo del carbono tanto en la tierra como en el océano, calculan las emisiones de CO₂ que son compatibles con una trayectoria de concentraciones de CO₂ atmosférico determinada. Las emisiones compatibles, durante un determinado período de tiempo, son iguales al aumento de carbono durante el mismo período en los tres reservorios activos que son la atmósfera, la tierra y el océano (Stocker *et al.*, 2013).

Espesor óptico global: Es una magnitud adimensional que revela el poder que poseen las partículas de aerosoles para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda al atravesar la atmósfera (Rojas, 2014).

Estratósfera: *“Región de la atmósfera abundantemente estratificada, situada sobre la troposfera, que abarca desde los 10 Km (9 Km en latitudes altas y 16 Km en los trópicos, en promedio) hasta los 50 Km de altitud”* (Stocker *et al.*, 2013, pág. 10).

Gases de efecto invernadero (GEI): *“Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la tierra, por la propia atmósfera y por las nubes”* (Stocker *et al.*, 2013, pág. 11). Los gases de efecto invernadero principales de la atmósfera terrestre son el vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃) (Stocker *et al.*, 2013).

Modelo del sistema tierra: Corresponde a un tipo de modelo de circulación general atmósfera-océano acoplado. Este modelo incluye la representación del ciclo del carbono, lo que permite el cálculo del CO₂ atmosférico o las emisiones compatibles. Además, puede incluir otros componentes, como la química de la atmósfera, mantos de hielo, vegetación dinámica o el ciclo del nitrógeno, como también modelos urbanos y de cultivos (Stocker *et al.*, 2013).

Modelos de Circulación General Atmósfera-Océano (MCGAO): Este tipo de modelos proporcionan la más completa representación del sistema climático disponible en la actualidad. En general los modelos climáticos son utilizados para estudiar y simular el clima, en particular para realizar predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales. Hoy en día se está evolucionando hacia modelos más complejos que puedan incorporar química y biología interactiva (Stocker *et al.*, 2013).

Nivel de confianza: En el desarrollo de este proyecto de título este concepto posee cinco calificativos: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (Stocker *et al.*, 2013), los cuales pueden ser visualizados en la Ilustración 70.

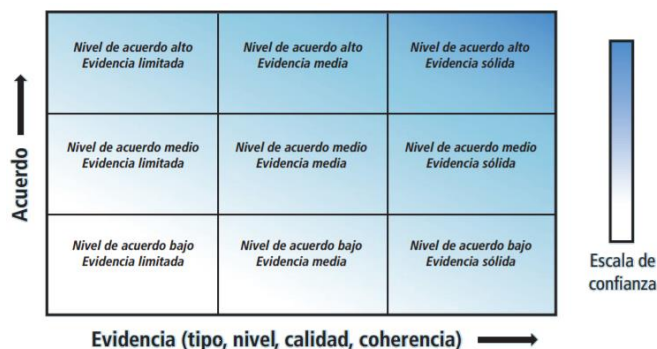


Ilustración 70: Representación del nivel de acuerdo, evidencia y confianza.
Fuente: (IPCC, 2013).

Oleaje completamente desarrollado: Oleaje tipo sea que ha alcanzado un equilibrio entre la tasa de energía entregada por el viento y la tasa de energía disipada por la turbulencia y la fricción del oleaje, es decir, es un oleaje que ha alcanzado el crecimiento máximo de sus características para una determinada condición de viento (Gobierno de España, 1992).

Oleaje limitado por duración: oleaje tipo sea en el que la duración de la condición del viento es menos prolongada de lo requerido para alcanzar un oleaje completamente desarrollado (Gobierno de España, 1992).

Oleaje limitado por fetch: Oleaje tipo sea en el que no se alcanza la condición de oleaje completamente desarrollado, ya que la longitud del *fetch* es menor a la requerida para alcanzar dicha condición (Gobierno de España, 1992).

Oleaje multimodal: “Tipo de oleaje con componentes de diferentes direcciones y periodos característicos que ocurren de manera simultánea” (Beyá *et al.*, 2016).

Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE): Es una organización intergubernamental, la cual reúne a 34 países, que en su conjunto representan el 80% del PIB mundial. La misión de esta organización es apoyar el crecimiento económico, mantener la estabilidad financiera, mejorar la calidad de vida, aumentar el empleo, contribuir al crecimiento del comercio mundial y asistir a otros países en su desarrollo económico (Gobierno de Chile, 2016).

Probabilidad: Probabilidad que ocurra un determinado acontecimiento, siempre que sea posible estimarla mediante métodos probabilísticos. En el desarrollo de ese proyecto de título se utilizan distintas expresiones de probabilidad (Stocker *et al.*, 2013):

- Prácticamente seguro: probabilidad entre 99 y 100%
- Sumamente probable: probabilidad entre 95 y 100%
- Muy probable: probabilidad entre 90 y 100%
- Probable: probabilidad entre 66 y 100%
- Improbable: probabilidad entre 0 y 33%
- Muy improbable: probabilidad entre 0 y 10%

Protocolo de Kyoto: Protocolo adoptado en 1997 en Kyoto, Japón, por la CMNUCC, entro en vigor el 16 de febrero de 2005. En este protocolo los países miembro se comprometieron a reducir, entre 2008 y 2012, sus emisiones antropógenas de gases de efecto invernadero, específicamente dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre, en un 5% como mínimo con respecto a los niveles observados en 1990. Los países que conforman el protocolo de Kyoto son aquellos de economía en transición y la gran mayoría de los países pertenecientes a la OCDE (Stocker *et al.*, 2013).

Protocolo de Montreal: Este protocolo fue adoptado en el año 1987 en Montreal, posteriormente fue modificado en Londres (1990), Copenhague (1992), Viena (1995), Montreal (1997) y Beijing (1999). El principal objetivo de este protocolo es controlar el consumo y la producción de sustancias químicas que contienen cloro y bromo, los cuales agotan y destruyen la capa de ozono estratosférico, como los clorofluorocarbonos, el metilcloroformo, el tetracloruro de carbono, entre otros (Stocker *et al.*, 2013).

Red auto-organizativa (Self-Organizing Maps, SOM): Las redes neuronales se inspiran en la biología, por lo que su forma de representar el conocimiento es abstracta y está en base a la arquitectura de la red y las conexiones que son establecidas entre las neuronas. Estos modelos son del tipo “caja negra”, ya que la única información disponible son los datos de entrada, los cuales representan un punto en el espacio donde se quieren obtener grupos homogéneos o clases, pero no se cuenta con un vector de salida asociado a cada dato disponible. La estructura de las SOM es competitiva, por lo que además de conexiones entre neuronas de capas consecutivas, poseen también conexiones entre las neuronas de la última capa (Gutiérrez *et al.*, 2004).

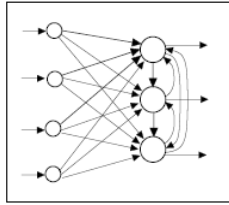


Ilustración 71: Estructura de una red neuronal competitiva.
Fuente: (Gutiérrez et al., 2004).

En general las redes neuronales competitivas están especialmente indicadas para trabajos en espacios de alta dimensionalidad, permiten organizar y visualizar datos de forma intuitiva y eficiente proyectándolos en un espacio arbitrario, el que generalmente es dos dimensiones (Gutiérrez et al., 2004).

Respuesta climática transitoria: Es medida en °C e indica la magnitud y rapidez de la respuesta de la temperatura en superficie al forzamiento debido a los gases de efecto invernadero. Específicamente es el cambio de la temperatura media global en superficie promediada a lo largo de un período de 20 años. Este promedio es centrado en el momento en el que se duplica el CO₂ atmosférico en una simulación de un modelo climático en el que el CO₂ incrementa en un 1% anual (Stocker et al., 2013).

Secular: “*Que sucede o se repite cada siglo*” (Real Academia Española, 2016).

Teledetección: Procedimiento o técnica de obtención de información sin tener contacto directo con ella. En el contexto de las ciencias de la tierra, la teledetección es una técnica que tiene por finalidad la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales (Pérez & Muñoz, 2006).

Triangulación de Delaunay: La triangulación de Delaunay de un conjunto de puntos es tal que el círculo único circunscrito (circunferencia que pasa por todos los vértices de un polígono regular) alrededor de cada triángulo no contiene otros puntos en el conjunto (Gallardo, 2012).

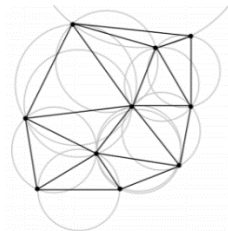


Ilustración 72: Triangulación de Delaunay sobre un conjunto de 10 puntos.
Fuente: (Gallardo, 2012).

Tropopausa: “*Frontera entre la tropósfera y la estratósfera*” (Stocker et al., 2013, pág. 20).

Tropósfera: “*Parte inferior de la atmósfera, comprendida entre la superficie y unos 10 Km de altitud media (variando, en promedio, entre 9 Km en latitudes altas y 16 Km en los*

trópicos), donde se encuentran las nubes y se producen los fenómenos meteorológicos” (Stocker et al., 2013, pág. 20).

Vientos alisios: Son vientos superficiales que soplan sobre los océanos en cada uno de los hemisferios, entre las latitudes 0 a 30°. Se distinguen dos tipos de vientos alisios los del noreste para el hemisferio norte y los del sureste para el hemisferio sur, estos vientos convergen hacia un área denominada zona de convergencia intertropical, zona cercana a la línea ecuatorial. Después de converger, los vientos alisios se dirigen, en general, de este a oeste. Durante la presencia del fenómeno de El Niño se produce un cambio en la intensidad y en la dirección de estos vientos, es decir, bajo una condición cálida (El Niño) los vientos alisios se debilitan en el oeste y centro del Océano Pacífico o invierten completamente su dirección, mientras que durante la fase fría (La Niña) estos vientos se ven reforzados (SHOA, 2004).

Vulnerabilidad: *“Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación” (Mach et al., 2014, pág. 13).* Existen dos perspectivas para analizar este concepto: Vulnerabilidad de resultado y vulnerabilidad de contexto. La vulnerabilidad de resultado *“es la cantidad potencial de daño causado a un sistema por un evento en particular en función de la exposición (medido de acuerdo con la frecuencia, duración y magnitud del evento) y la sensibilidad”*. La vulnerabilidad de contexto apunta a una vulnerabilidad preexistente, determinada por factores subyacentes, del ámbito social, político, económico, cultural e institucional (PNUD, 2016).

Wave setup: Es la sobreelevación del nivel medio del mar causado por la acción de las olas.

10 REFERENCIAS

- Agencia Europea de Medio Ambiente. (1998). *Agencia Europea de Medio Ambiente*. Obtenido de <http://www.eea.europa.eu/es/publications/92-9167-087-1/page001.html>
- Alvarez, D., Matiz, J., & Cardenas, A. (21 de Septiembre de 2011). Modelos digitales batimétricos generados por método de interpolación IDW, Kriging, Shepard y B-Spline en el archipiélago de Islas del Rosario. *GEOMÁTICA UD. GEO*, 3-14.
- BENTOS. (s.f.). *BENTOS*. Obtenido de BENTOS: <http://www.bentos.cl/esp/archivos/Oleaje.pdf>
- Beyá, I., Borchert, M., Zamorano, L., & Díaz, M. (2016). *Diseño conservación defensas costeras sectores Avenida Perú y Juan de Saavedra*. Santiago.
- Beyá, J. (25 de marzo de 2014). Generación del oleaje.
- Beyá, J., Winckler, P., Molina, M., Torres, S., Bertin, K., Jabir, J.-F., . . . Valdivia, J. (2016). *Atlas de oleaje de Chile*. Obtenido de Atlas de oleaje de Chile: <http://oleaje.uv.cl/descargables/Atlas%20de%20Oleaje%20de%20Chile.pdf>
- Campos, R. (2016). *Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*. Valparaíso.
- Carta, J., Calero, R., Colmenar, A., & Castro, M.-A. (2009). *Centrales de energías renovables*. Madrid: UNED, PEARSON Prentice Hall.
- Centro de Cambio Global y Centro de Políticas Públicas de la Universidad Católica de Chile. (Agosto de 2010). *GreenLabUC*. Obtenido de GreenLabUC: http://www.greenlabuc.cl/?page_id=30
- CEPAL. (Septiembre de 2015). *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. Obtenido de Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL): http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3955/S1500961_es.pdf?sequence=4
- Cofré, C., & Beyá, J. (Octubre de 2016). *VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación portuaria*. Obtenido de VII Seminario Internacional de Ingeniería y Operación portuaria: http://www.siop2016.cl/sites/default/files/cofre_-_proyecciones_y_tendencias_en_el_clima_de_oleaje_en_las_costas_chilenas_0.pdf
- Contreras, M., Winckler, p., & Molina, M. (2012). Implicancias de la variación del nivel medio del mar por cambio climático en obras de ingeniería costera de Chile. *Revista chilena de ingeniería*, 53-65.
- de la Cuadra, F. (2013). Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas. Una vinculación necesaria. *Polis, Revista Latinoamericana*, 525-532.
- Delft University of Technology. (s.f.). *Delft University of Technology*. Obtenido de Delft University of Technology: <http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swanuse.pdf>
- Departamento de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente. (1 de Diciembre de 2014). *Ministerio del Medio Ambiente, Chile*. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente, Chile: <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2016/02/Plan-Nacional-Adaptacion-Cambio-Climatico-version-final.pdf>
- Estenssoro, F. (2010). Crisis ambiental y cambio climático en la política global: Un tema creciente complejo para América Latina. *UNIVERSUM*, 55-77.
- Field, C., Barros, V., Dokken, D., Mach, K., Mastrandrea, M., Bilir, T., . . . White, L. (2014). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel

- on Climate Change: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIAR5-IntegrationBrochure_es.pdf
- Foreman, M. (1977). *Ocean Mapping Group*. Obtenido de Ocean Mapping Group: http://www.omg.unb.ca/GGE/5013_LABS/heights.pdf
- G.I.O.C. (2000). *Documento de referencia. Volumen I. Dinámicas*. Santander.
- Gallardo, D. (Junio de 2012). *Repositorio Académico de la Universidad de Chile*. Obtenido de Repositorio Académico de la Universidad de Chile: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/111303/cf-gallardo_fp.pdf?sequence=1
- Garreaud, R. (2011). Cambio climático: Bases físicas e impactos en Chile. *Tierra Adentro-INIA*, 13-19.
- Gobierno de Chile. (2011). *Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile*. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile: <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-46280.html>
- Gobierno de Chile. (2016). *Dirección General de Relaciones Económicas Internacionales*. Obtenido de Dirección General de Relaciones Económicas Internacionales : <http://www.direcon.gob.cl/ocde/>
- Gobierno de Chile. (2016). *Segundo informe bienal de actualización de Chile sobre cambio climático*. Santiago.
- Gobierno de España. (Abril de 1990). *Puertos del Estado*. Obtenido de Puertos del Estado: <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%200.2-90.pdf>
- Gobierno de España. (1992). *Puertos del Estado*. Obtenido de Puertos del Estado: <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%200.3-91.pdf>
- Gobierno de España. (Noviembre de 2005). *Puertos del Estado*. Obtenido de Puertos del Estado: <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%200.5-05.pdf>
- Gobierno de España. (Diciembre de 2009). *Puertos del Estado*. Obtenido de Puertos del Estado: <http://www.puertos.es/es-es/BibliotecaV2/ROM%201.0-09.pdf>
- Goda, Y. (1988). *Coastal Engineering Proceedings*. Obtenido de Coastal Engineering Proceedings: <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/viewFile/4274/3955>
- Goda, Y. (2000). *Random seas and design of maritime structures*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Goda, Y. (2003). Revisiting Wilson's formulas for simplified wind-wave prediction. *Journal of waterway port coastal and ocean engineering*, 93-95.
- Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales, U. d. (2014-2015). *Universidad de Granada*. Obtenido de Universidad de Granada: <http://wdb.ugr.es/~mdiezm/wp-content/uploads/IMCtema05mastro-2014-2015.pdf>
- Guisado, E., Malvárez, G., & Navas, F. (2010). *Dialnet*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3396194>
- Gutiérrez, J., Cano, R., Cofiño, A., & Sordo, C. (2004). *Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas*. Santander.
- Hemer, M. A., & Trenham, C. A. (26 de Noviembre de 2015). *ELSEVIER*. Obtenido de ELSEVIER: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1463500315002127>
- Hernández, C. (2014). Cátedra Diseño de Obras Marítimas U.V. Santiago.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2010). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- INH. (2016). *Diseño conservación defensas costeras sectores Avenida Perú y Juan de Saavedra*. Instituto Nacional de Hidráulica, Santiago.

- Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria . (Septiembre de 2015). *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. Obtenido de Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL): http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3955/S1500961_es.pdf?sequence=4
- IPCC. (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf
- IPCC. (2014). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/AR5_WGII_glossary_ES.pdf
- IPCC. (29 de Marzo de 2016). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: www.ipcc.ch
- IPCC. (29 de Marzo de 2016). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/frontmatterspreface.html
- Kamphuis, J. (2000). *Introduction to coastal engineering and management*. Kingston: World Scientific.
- Liu, Z., & Frigaard, P. (Enero de 2001). *documents.mx*. Obtenido de documents.mx: <http://documents.mx/documents/generation-and-analysis-of-random-waves.html>
- Losada, Í. (Octubre de 2012). *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. Obtenido de Comisión Económica para América Latina y el Caribe: http://www.cepal.org/sites/default/files/courses/files/inigo_losada2.pdf
- Losada, M., González, J., Ametller, S., Arana, M., Berenguer, J., Berruguete, A., . . . Flores, J. (Julio de 2006). *Recomendaciones del Diseño y Ejecución de las Obras de Abrigo*. España.
- Mach, K., Planton, S., von Stechow, C., Allen, M., Broome, J., Church, J., . . . van Vuuren, D. (2014). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_glossary_ES.pdf
- Martínez, C., Contreras, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E., & Agredano, R. (2017). *Coastal erosion in central Chile: A new hazard?* Santiago, Chile.
- Minetti, J. (2007). La respuesta de anticiclón del Pacífico Sur en la costa de Chile frente al cambio climático-impactos. *Boletín Geográfico*, 9-22.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2017). *Ministerio del Medio Ambiente*. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente: http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/07/plan_nacional_climatico_2017_2.pdf
- MMA. (2013). *Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile*. Obtenido de Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile: http://www.mma.gob.cl/1304/articles-55412_PlanNacionalAdaptacionCClimatico.pdf
- Molina, M. (2011). *Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile*.
- Mora, A. (2005). Guía para elaborar una propuesta de investigación. *Educación*, 67-97.
- National Weather Service. (Mayo de 2013). *National Weather Service*. Obtenido de <http://www.nws.noaa.gov/om/hurricane/resources/TropicalCyclones11.pdf>
- Negro, V., Varela, O., García, J., & Santos, J. (2002). *Diseño de diques verticales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Negro, V., Varela, O., García, J., López, J., & Mora, J. (2002). *Diseño de diques rompeolas*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

- NOAA. (Agosto de 2015). *National Oceanic Atmospheric Administration, NOAA*. Obtenido de National Oceanic Atmospheric Administration, NOAA: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/glacial-adjustment.html>
- OCDI. (2002). *Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan*. Japan Ports and Harbours Association.
- Peltier, W. (2000). Earth physics and global glacial isostasy: From paleo-geodesy to space-geodesy . En *International Association of Geodesy Symposia* (págs. 7-12). Canada: Rizos, Chris.
- Peréz, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Universidad de Salamanca.
- Pérez, G. (2008). *Investigación cualitativa. Retos e interrogantes*. Madrid: La muralla.
- PNUD. (2016). *Tercera comunicación nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático*.
- Pullen, T., Allsop, N., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H., & van der Meer, J. (2007). *EurOtop*.
- Real Academia Española. (2016). *Real Academia Española*. Obtenido de Real Academia Española: <http://dle.rae.es/?id=XQ7TgZM>
- Rodrigo, C. (2008). La Corriente Circumpolar Antártica y su influencia en el clima . *Boletín Antártico Chileno*, 15-16.
- Rojas , N. (2014). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. Obtenido de Universidad Nacional Mayor de San Marcos: http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/cybertesis/4077/1/Rojas_bn.pdf
- SHOA. (1999). *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada*. Obtenido de Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada: <http://www.shoa.cl/datos/descargas/pdf/pub3202.pdf>
- SHOA. (2004). *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA)*. Obtenido de Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA): http://www.shoa.cl/servicios/enos/pdf/2004_antece.pdf
- SHOA. (2005). *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada*. Obtenido de Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada: http://www.shoa.cl/datos/descargas/pdf/pub3201_3ed-v4_2015.pdf
- SHOA. (4 de Noviembre de 2011). *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada*. Obtenido de Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada: http://www.shoa.cl/datos/descargas/pdf/pub3105_4ed_modif_2015.pdf
- Sierra, J., & Lo Presti, A. (Marzo de 1998). *Dialnet*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4820560>
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*.
- Sousa, V., Driessnack, M., & Costa, I. (2007). Revisión de diseños de investigación resaltantes para enfermería. Parte 1: Diseños de investigación cuantitativa. *Latino-Americana de Enfermagem*, 502-507.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L., Allen, S., Bindoff, N., . . . Xie, S.-P. (2013). *Intergovernmental panel on climate change*. Obtenido de Intergovernmental panel on climate change: http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_TS_FAQ_ES.pdf
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Midgley, P. (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_ES.pdf

- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Midgley, P. (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1_AR5_SPM_ES.pdf
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Midgley, P. (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_AnnexIII_FINAL.pdf
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., . . . Midgley, P. (2013). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf
- UNFCCC. (Noviembre de 2007). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Obtenido de United Nations Framework Convention on Climate Change: http://unfccc.int/resource/docs/publications/unitingonclimate_spa.pdf
- UNFCCC. (2014). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Obtenido de United Nations Framework Convention on Climate Change: http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/la_convencion/historia/items/6197.php
- Urrutia, O. (2010). El régimen jurídico internacional del cambio climático después del "Acuerdo de Copenhague". *Revista de derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*, 597-633.
- USACE. (1984). *Shore Protection Manual, Volumen II*. Washington DC.
- USACE. (30 de Abril de 2002). *US Army Corps of Engineers*. Obtenido de US Army Corps of Engineers: http://www.pdhonline.com/courses/c772/Part-II-Chap_8entire.pdf
- USACE. (30 de Abril de 2002). *US Army Corps of Engineers*. Obtenido de US Army Corps of Engineers: http://www.pdhonline.com/courses/c772/Part-II-Chap_3entire.pdf
- USACE. (31 de Julio de 2003). *US Army Corps of Engineers*. Obtenido de US Army Corps of Engineers: http://www.pdhonline.com/courses/c772/Part-II-Chap_4entire.pdf
- USACE. (28 de Septiembre de 2011). *US Army Corps of Engineers*. Obtenido de US Army Corps of Engineers: http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1100_Part-02.pdf?ver=2016-02-11-153511-290
- USACE. (28 de Septiembre de 2011). *US Army Corps of Engineers*. Obtenido de US Army Corps of Engineers: <http://www.pdhonline.com/courses/c598/Part%20VI%20Chap%205.pdf>
- Vicuña, S., Meza, F., Donoso, G., Demaria, E., Chadwick, C., Camaño, M., . . . Molina, M. (2013). *Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático*. Santiago.
- Vicuña, S., Meza, F., Gironás, J., Cienfuegos, R., Donoso, G., Lapuente, P., . . . Letelier, M. (2014). *Propuesta de un portafolio de medidas para elaborar el plan de adaptación al cambio climático para la infraestructura*. Santiago, Chile.
- Villaseñor, T. (Diciembre de 2008). *Repositorio académico de la Universidad de Chile*. Obtenido de Repositorio académico de la Universidad de Chile: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2008/villasenor_t/sources/villasenor_t.pdf
- Winckler, P., Reyes, M., Contreras, M., & Cortes, F. (Diciembre de 2015). *ResearchGate*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/287218556_Evaluacion_de_riesgos_de_infraestructura_costera_en_un_contexto_de_cambio_climatico

11 ANEXOS

11.1 PROYECCIONES DE PARÁMETROS DEL OLAJE

Desde la Tabla 28 a la Tabla 37 se presentan los sets de datos históricos y los cuatro sets de proyecciones de los escenarios RCP. La información que se presenta en estas tablas es la misma utilizada para la realización de las Ilustración 23 a la Ilustración 27 y corresponden a aguas profundas.

Tabla 28: Alturas significativas y direcciones datos históricos.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total
	[0.50 - 1.00[	[1.00 - 1.50[	[1.50 - 2.00[	[2.00 - 2.50[	[2.50 - 3.00[	[3.00 - 3.50[	[3.50 - 4.00[	[4.00 - 4.50[	>= 4.50	
N	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ESE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00	0.08
SSW	0.00	0.09	0.83	2.26	3.75	3.98	3.08	1.56	0.94	16.48
SW	0.01	0.49	3.48	10.20	14.55	14.59	10.37	5.68	4.08	63.45
WSW	0.01	0.27	1.63	2.92	2.92	2.08	1.15	0.66	0.55	12.19
W	0.01	0.07	0.32	0.66	0.59	0.33	0.20	0.11	0.04	2.32
WNW	0.00	0.16	0.64	1.20	1.30	0.55	0.22	0.05	0.01	4.14
NW	0.00	0.02	0.16	0.38	0.38	0.15	0.05	0.02	0.01	1.17
NNW	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03	0.13
Total	0.03	1.09	7.07	17.66	23.54	21.73	15.11	8.10	5.67	100.00

Tabla 29: Periodos y direcciones datos históricos.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27	
N	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ESE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
SSW	0.06	3.52	3.68	6.80	2.29	0.14	0.00	0.00	0.00	16.48
SW	0.00	0.40	12.58	37.59	11.68	1.16	0.04	0.00	0.00	63.45
WSW	0.00	0.06	3.17	6.85	1.96	0.14	0.00	0.00	0.00	12.19
W	0.00	0.05	0.66	0.80	0.76	0.05	0.00	0.00	0.00	2.32
WNW	0.00	0.05	0.04	0.55	2.74	0.73	0.04	0.00	0.00	4.14
NW	0.01	0.07	0.01	0.08	0.67	0.29	0.05	0.00	0.00	1.17
NNW	0.01	0.11	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
Total	0.11	4.34	20.16	52.66	20.10	2.50	0.13	0.00	0.00	100.00

Tabla 30: Alturas significativas y direcciones de proyecciones RCP 4.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total
	[0.50 - 1.00[	[1.00 - 1.50[	[1.50 - 2.00[	[2.00 - 2.50[	[2.50 - 3.00[	[3.00 - 3.50[	[3.50 - 4.00[	[4.00 - 4.50[	>= 4.50	
N	0.00	0.00	0.01	0.03	0.05	0.04	0.03	0.03	0.06	0.25
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
E	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ESE	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06
SSW	0.00	0.20	1.07	2.09	2.41	2.05	1.21	0.55	0.28	9.86
SW	0.03	1.01	4.77	8.60	9.99	6.98	3.79	1.44	1.08	37.69
WSW	0.05	0.89	3.71	6.15	5.63	3.30	1.31	0.51	0.40	21.95
W	0.02	0.37	1.60	3.14	2.83	1.27	0.45	0.13	0.14	9.95
WNW	0.01	0.39	2.14	5.56	5.41	2.79	0.72	0.17	0.11	17.31
NW	0.00	0.04	0.30	0.67	0.74	0.36	0.15	0.05	0.07	2.39
NNW	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10	0.10	0.10	0.05	0.09	0.49
Total	0.12	2.92	13.64	26.31	27.18	16.90	7.75	2.94	2.23	100.00

Tabla 31: Periodos y direcciones de proyecciones RCP 4.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27	
N	0.02	0.19	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
NNE	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
E	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ESE	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
SSW	0.06	1.47	0.82	3.36	3.14	0.86	0.14	0.01	0.00	9.86
SW	0.00	0.26	3.24	18.03	12.26	3.24	0.59	0.07	0.00	37.69
WSW	0.00	0.09	2.55	13.98	4.54	0.72	0.07	0.01	0.00	21.95
W	0.00	0.10	1.12	5.54	2.74	0.43	0.02	0.00	0.00	9.95
WNW	0.00	0.23	0.44	4.36	7.15	4.16	0.74	0.23	0.00	17.31
NW	0.01	0.32	0.15	0.20	0.59	0.81	0.24	0.06	0.00	2.39
NNW	0.01	0.36	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.49
Total	0.15	3.09	8.47	45.46	30.42	10.23	1.80	0.38	0.00	100.00

Tabla 32: Alturas significativas y direcciones de proyecciones RCP 8.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total
	[0.50 - 1.00[	[1.00 - 1.50[	[1.50 - 2.00[	[2.00 - 2.50[	[2.50 - 3.00[	[3.00 - 3.50[	[3.50 - 4.00[	[4.00 - 4.50[	>= 4.50	
N	0.01	0.01	0.01	0.05	0.04	0.05	0.02	0.01	0.03	0.23
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
E	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ESE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SSW	0.02	0.16	0.74	0.82	0.62	0.17	0.03	0.00	0.00	2.57
SW	0.21	2.32	7.60	9.67	7.35	3.42	1.17	0.36	0.24	32.34
WSW	0.21	2.04	6.44	7.44	4.42	2.02	0.68	0.30	0.24	23.78
W	0.07	0.89	3.66	4.47	2.62	0.96	0.34	0.11	0.12	13.25
WNW	0.02	1.02	5.84	8.79	6.16	1.73	0.23	0.04	0.05	23.88
NW	0.00	0.05	0.67	0.90	0.63	0.31	0.11	0.04	0.07	2.79
NNW	0.00	0.00	0.04	0.12	0.26	0.28	0.17	0.12	0.13	1.12
Total	0.54	6.50	25.01	32.29	22.11	8.93	2.76	0.98	0.88	99.99

Tabla 33: Periodos y direcciones de proyecciones RCP 8.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27	
N	0.04	0.17	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
E	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ESE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SSW	0.01	0.01	0.02	0.91	1.12	0.41	0.07	0.01	0.00	2.57
SW	0.01	0.52	2.16	15.31	10.87	2.90	0.52	0.07	0.00	32.35
WSW	0.00	0.05	3.45	14.66	4.77	0.76	0.09	0.01	0.00	23.78
W	0.00	0.11	1.95	7.52	3.18	0.48	0.02	0.00	0.00	13.25
WNW	0.00	0.15	0.40	6.40	10.12	5.61	1.00	0.19	0.00	23.88
NW	0.02	0.53	0.16	0.24	0.73	0.88	0.18	0.06	0.00	2.79
NNW	0.03	0.91	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.12
Total	0.14	2.47	8.33	45.03	30.78	11.04	1.88	0.34	0.00	100.00

Tabla 34: Alturas significativas y direcciones de proyecciones RCP 4.5 finales de siglo.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total
	[0.50 - 1.00[	[1.00 - 1.50[	[1.50 - 2.00[	[2.00 - 2.50[	[2.50 - 3.00[	[3.00 - 3.50[	[3.50 - 4.00[	[4.00 - 4.50[	>= 4.50	
N	0.00	0.01	0.02	0.02	0.05	0.04	0.04	0.01	0.02	0.21
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
ESE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.03	0.16	0.45	0.58	0.37	0.07	0.01	0.00	0.00	1.67
SW	0.28	2.76	7.73	9.51	6.24	2.79	1.07	0.34	0.12	30.83
WSW	0.24	2.17	6.31	7.46	4.74	2.06	0.79	0.36	0.24	24.37
W	0.07	1.09	3.69	5.06	2.91	0.71	0.18	0.06	0.08	13.84
WNW	0.08	1.08	5.72	10.79	5.87	1.16	0.16	0.04	0.02	24.93
NW	0.00	0.07	0.56	1.26	0.68	0.29	0.10	0.03	0.05	3.05
NNW	0.00	0.01	0.02	0.11	0.21	0.25	0.20	0.12	0.14	1.06
Total	0.70	7.35	24.53	34.81	21.06	7.38	2.55	0.96	0.67	100.00

Tabla 35: Periodos y direcciones de proyecciones RCP 4.5 finales de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27	
N	0.04	0.15	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ENE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
E	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
ESE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.02	0.01	0.02	0.54	0.78	0.24	0.05	0.00	0.00	1.67
SW	0.01	0.57	2.30	14.48	9.95	3.00	0.47	0.05	0.00	30.83
WSW	0.00	0.06	3.49	15.55	4.52	0.67	0.07	0.01	0.00	24.37
W	0.00	0.08	1.82	8.36	3.16	0.39	0.02	0.00	0.00	13.84
WNW	0.00	0.18	0.27	7.05	10.70	5.68	0.81	0.23	0.00	24.93
NW	0.02	0.42	0.13	0.16	0.96	1.05	0.25	0.05	0.00	3.05
NNW	0.05	0.83	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.06
Total	0.17	2.32	8.25	46.14	30.07	11.04	1.67	0.34	0.00	100.00

Tabla 36: Alturas significativas y direcciones de proyecciones RCP 8.5 finales de siglo.

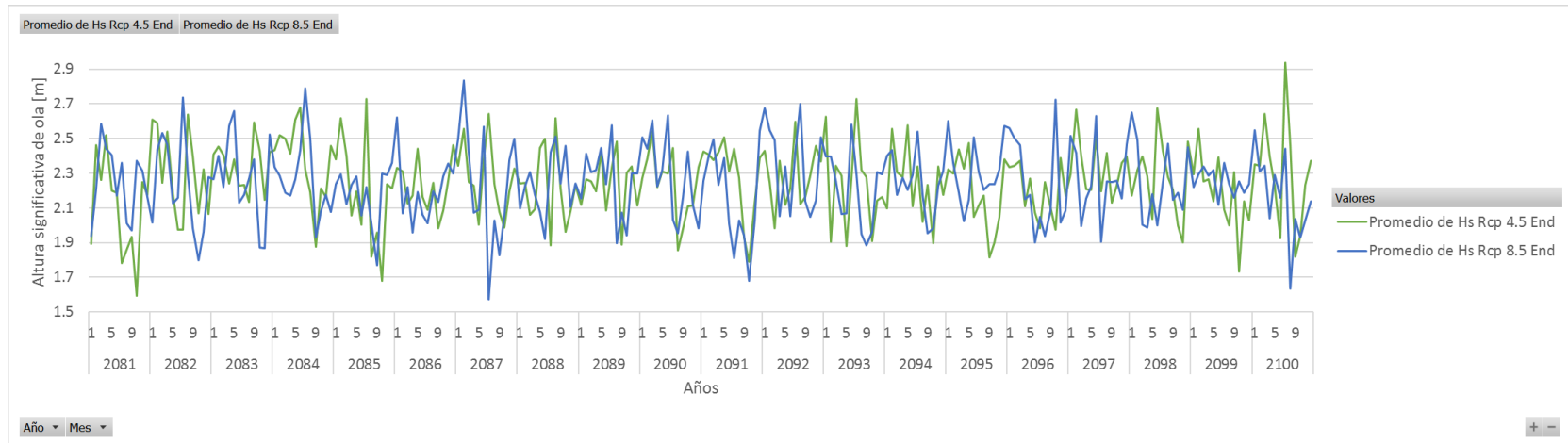
Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total
	[0.50 - 1.00[	[1.00 - 1.50[	[1.50 - 2.00[	[2.00 - 2.50[	[2.50 - 3.00[	[3.00 - 3.50[	[3.50 - 4.00[	[4.00 - 4.50[	>= 4.50	
N	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.12
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ENE	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
E	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
ESE	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.01	0.16	0.61	0.67	0.39	0.17	0.03	0.02	0.00	2.06
SW	0.20	3.18	9.81	11.44	7.77	3.18	1.00	0.33	0.14	37.07
WSW	0.17	2.51	6.68	7.17	4.72	1.81	0.49	0.27	0.28	24.09
W	0.10	1.04	3.27	3.93	2.18	0.76	0.16	0.04	0.07	11.56
WNW	0.05	0.88	4.56	8.75	5.44	1.53	0.22	0.02	0.02	21.47
NW	0.00	0.12	0.42	1.15	0.71	0.34	0.10	0.05	0.04	2.93
NNW	0.00	0.01	0.03	0.08	0.15	0.13	0.11	0.06	0.07	0.64
Total	0.52	7.90	25.40	33.25	21.41	7.94	2.14	0.81	0.63	100.00

Tabla 37: Periodos y direcciones de proyecciones RCP 8.5 finales de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27	
N	0.01	0.09	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12
NNE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NE	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
ENE	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
E	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
ESE	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
SE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.01	0.03	0.75	0.93	0.28	0.06	0.00	0.00	2.06
SW	0.02	0.63	2.25	17.21	12.69	3.51	0.65	0.10	0.00	37.07
WSW	0.00	0.02	3.18	15.44	4.70	0.73	0.01	0.00	0.00	24.09
W	0.00	0.12	1.32	6.73	2.96	0.41	0.01	0.00	0.00	11.56
WNW	0.00	0.17	0.23	6.20	9.07	4.71	0.86	0.23	0.00	21.47
NW	0.03	0.37	0.15	0.20	0.83	1.03	0.27	0.05	0.00	2.93
NNW	0.04	0.48	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64
Total	0.14	1.93	7.29	46.53	31.19	10.67	1.87	0.38	0.00	100.00

En la Ilustración 73 a) se presentan los sets de proyecciones correspondientes a los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de finales de siglo (2081-2100) en aguas profundas. La Ilustración 73 b) presenta los sets de proyecciones de los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de mediados de siglo (2026-2045) en aguas profundas.

a)



b)

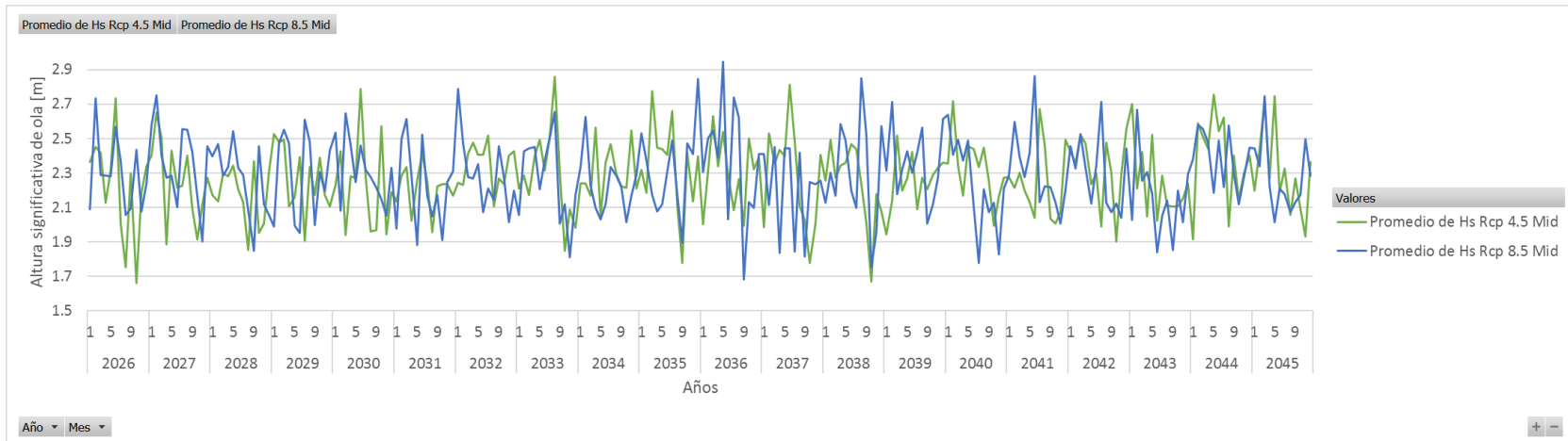


Ilustración 73: Sets de proyecciones.

11.2 CLIMA EXTREMO

Desde la Tabla 38 a la Tabla 42 se presentan las tormentas seleccionadas para la realización del análisis de clima extremo para cada uno de los sets de proyecciones, se incluye además el set de datos históricos.

Tabla 38: Tormentas clima extremo set de datos históricos.

Año	Mes	Día	Hora	Hs	Tp	Dp
1990	3	29	21	7.99	17.85	210.39
1992	8	22	12	7.74	18.38	238.11
1982	6	8	18	7.46	18.01	217.39
1993	5	7	18	7.05	16.14	223.76
1981	8	2	21	6.99	16.99	241.32
1983	7	14	15	6.93	17.97	217.48
1985	5	25	15	6.91	16.66	234.88
1981	5	18	18	6.86	17.68	224.21
1983	6	21	15	6.81	15.83	222.51
1991	7	25	6	6.69	16.93	231.28
1997	6	21	21	6.69	15.16	234.12
1981	5	4	3	6.68	17.29	223.49
2007	9	5	12	6.62	17.09	232.16
1994	6	18	6	6.61	17.42	230.56
1985	9	10	12	6.59	18.67	213.45
1989	4	5	9	6.59	16.52	211.82
1989	7	27	21	6.44	15.33	230.27
1992	9	22	9	6.44	15.37	218.24
1986	10	16	18	6.43	17.73	226.01
1989	10	7	18	6.42	19.07	215.63
1989	6	22	12	6.40	17.68	219.29
1987	7	25	9	6.39	14.35	249.79
1984	7	5	15	6.36	14.41	245.42
1990	7	27	3	6.21	15.61	225.95
1990	10	5	15	6.07	16.37	215.15
1986	5	27	21	6.05	14.60	243.47
1990	10	15	6	6.05	17.37	211.19
2005	5	17	21	6.04	14.93	220.61
2003	8	22	12	6.03	15.44	213.85
1984	5	25	6	6.00	16.13	213.54
1988	8	13	12	5.99	15.34	238.69
2003	10	31	18	5.96	15.45	225.91
1988	10	5	12	5.95	17.76	225.68
2000	7	28	0	5.95	17.46	232.84
2009	7	6	0	5.95	16.17	234.03
1985	4	17	12	5.94	15.05	214.45
1992	10	20	3	5.94	16.41	223.14
1979	5	18	9	5.92	16.18	232.48
1981	11	25	21	5.91	17.78	217.71
1980	8	21	21	5.86	16.08	220.25
1984	4	29	3	5.86	18.59	212.98
1988	11	20	21	5.86	18.48	225.21
1983	10	22	0	5.84	18.17	216.63
1985	8	15	3	5.84	15.78	225.39

Año	Mes	Día	Hora	Hs	Tp	Dp
1989	5	10	6	5.83	17.17	228.32
1996	8	13	9	5.83	14.81	245.98
2003	6	13	9	5.81	16.93	246.79
1983	9	5	9	5.79	17.64	219.94
1989	3	7	3	5.79	16.66	219.25
2009	3	30	3	5.79	16.50	217.49
1979	8	1	9	5.78	15.84	244.87
1982	5	16	15	5.78	15.25	247.21
1992	4	24	12	5.76	16.27	211.92
2002	10	10	6	5.75	15.79	229.54
2007	10	17	12	5.75	17.36	225.49
1984	12	2	3	5.74	16.73	226.12
1979	9	4	3	5.73	17.44	210.20
2004	6	23	6	5.73	15.49	239.26
1983	8	5	6	5.72	18.03	229.23
2004	3	18	0	5.71	15.53	224.94
1989	8	30	6	5.67	16.85	227.74
1991	9	21	6	5.67	16.53	223.46
1990	8	20	21	5.65	16.36	207.31
1984	8	23	18	5.64	15.23	217.31
1995	8	13	18	5.64	14.61	225.88
1988	6	17	12	5.63	15.58	228.85
1996	5	28	0	5.63	16.48	240.42
2005	8	16	18	5.63	13.99	256.05
1986	5	2	6	5.62	16.72	244.72
1988	9	8	6	5.62	17.85	223.18
1999	8	13	0	5.62	9.82	203.42
1994	9	24	6	5.61	14.26	235.40
1987	5	7	15	5.60	14.66	215.00
1989	7	1	15	5.59	15.07	218.06
1994	5	24	3	5.58	13.48	262.27
1998	7	28	12	5.58	16.41	217.27
1993	8	16	9	5.57	16.17	219.94
1984	10	12	21	5.56	16.35	238.97
1993	5	19	21	5.56	14.02	256.81
2007	8	15	0	5.56	14.58	231.94
2007	8	29	0	5.56	16.03	212.17
1990	11	16	9	5.55	16.18	208.65
2004	9	20	0	5.55	15.60	215.38
1992	12	23	9	5.54	15.70	233.33
1998	7	4	12	5.54	14.70	223.57
2006	6	8	3	5.54	14.03	248.20
1980	6	26	0	5.51	17.28	211.19
1983	5	3	12	5.51	15.60	229.80
2006	10	31	21	5.51	16.48	219.67
1996	5	17	6	5.50	14.39	215.38
1998	6	20	15	5.50	17.86	228.66
2008	8	7	0	5.50	15.41	218.13
1986	3	14	18	5.48	16.32	226.56
1998	8	20	12	5.48	14.75	213.26
2003	7	9	12	5.48	15.49	211.51
1981	8	14	3	5.47	16.79	210.02

Año	Mes	Dia	Hora	Hs	Tp	Dp
2009	9	17	15	5.47	16.89	214.36
1994	8	7	3	5.45	16.38	222.29
1995	5	16	21	5.45	16.89	231.79
2003	9	6	9	5.45	13.57	237.01
1990	6	27	18	5.44	15.65	209.24
1998	5	29	0	5.44	16.62	240.22
1983	3	6	6	5.43	14.52	214.89
1987	4	25	21	5.40	15.60	230.13
1979	7	26	12	5.39	14.16	247.12
1981	11	3	12	5.39	15.73	225.83
1982	8	28	18	5.39	12.97	251.13
1992	6	5	12	5.39	8.06	335.16
1979	9	22	0	5.37	16.18	216.32
1982	8	12	18	5.37	16.21	225.66
1983	5	28	18	5.37	15.40	221.94
1991	6	2	21	5.37	12.65	267.20
2003	7	21	0	5.37	14.35	218.36
2004	7	3	12	5.37	14.64	218.02
2009	8	13	6	5.36	14.74	240.64
1998	10	1	21	5.35	16.91	226.98
1989	8	15	6	5.34	16.40	222.27
1983	4	5	18	5.33	17.69	208.93
1987	4	14	0	5.33	16.53	205.03
1990	11	5	0	5.33	14.56	212.62
1980	5	27	21	5.31	14.02	231.72
1983	8	27	3	5.31	15.97	228.77
2005	5	3	21	5.31	14.20	217.65
2007	6	22	3	5.31	15.22	216.92
1984	5	3	0	5.30	16.37	214.96
1985	11	17	0	5.30	16.17	218.94
2002	1	14	3	5.30	9.27	206.62
1986	8	24	12	5.29	16.64	230.78
1980	5	11	0	5.28	14.18	223.58
1982	3	23	9	5.28	15.84	220.64
1983	2	25	9	5.28	15.21	226.35
1981	2	27	9	5.26	17.27	214.16
1990	12	3	6	5.26	14.40	213.88
1991	1	14	3	5.26	16.53	227.50
2000	6	28	9	5.26	13.40	235.91
2001	8	26	15	5.25	13.34	234.94
1982	9	17	9	5.24	17.35	212.40
1983	11	5	9	5.23	16.18	222.29
1989	12	6	3	5.23	14.66	220.91
2000	6	15	6	5.23	12.93	249.08
2005	9	10	12	5.23	15.19	219.90
2009	6	29	12	5.23	13.25	250.22
1980	4	6	12	5.22	17.33	209.92
2002	5	3	0	5.22	17.21	209.83
2007	4	7	15	5.22	17.21	230.47
1999	5	31	18	5.21	16.96	234.88
1991	5	3	12	5.19	15.00	212.10
1992	6	17	12	5.19	15.39	231.25
1999	7	2	9	5.19	13.49	227.31
2001	9	2	9	5.17	16.45	214.55

Año	Mes	Día	Hora	Hs	Tp	Dp
2002	5	14	21	5.17	9.24	338.48
1980	10	22	6	5.16	15.65	211.68
1983	8	15	0	5.16	14.45	213.41
1988	4	19	18	5.16	15.55	219.31
1988	5	22	18	5.16	16.70	218.02
1989	10	27	0	5.16	13.26	217.71
1991	8	17	6	5.16	15.08	224.78
1995	3	7	0	5.16	14.73	220.66
1997	6	3	21	5.16	7.81	331.98
2004	7	22	0	5.16	14.16	251.81
2009	5	19	0	5.16	15.71	214.72
1993	7	12	18	5.15	16.16	215.42
1985	3	12	15	5.14	17.05	213.79
1987	1	5	9	5.14	15.63	226.49
2000	9	2	3	5.14	15.86	218.62
2002	4	8	3	5.14	14.14	223.29
2002	4	26	15	5.14	15.26	218.65
1986	2	17	18	5.13	15.99	220.75
2006	8	14	0	5.13	13.43	232.05
1984	12	13	3	5.12	16.49	220.82
1991	11	5	21	5.12	17.45	216.90
2006	6	18	3	5.12	14.61	239.06
1981	6	30	9	5.11	15.61	214.84
1982	1	21	9	5.11	15.52	232.75
1997	8	18	3	5.11	16.36	210.99
1982	7	16	12	5.10	13.30	259.44
1980	8	10	12	5.09	14.45	227.93
1986	7	14	6	5.09	16.36	208.85
1988	3	30	18	5.09	14.84	221.88
1990	6	4	3	5.09	13.50	220.74
2001	2	11	6	5.09	13.55	227.84
2001	6	3	6	5.09	15.00	215.23
1980	11	6	0	5.08	15.63	216.23
1997	7	16	12	5.08	16.07	207.87
1998	9	27	0	5.08	14.79	222.52
1984	10	27	0	5.07	15.06	230.40
1988	3	18	0	5.07	16.46	232.43
1987	12	15	6	5.06	14.68	220.42
2002	5	26	12	5.06	10.57	299.24
1988	12	19	0	5.05	14.83	216.76
2002	9	17	6	5.05	13.67	238.30
1986	4	6	3	5.03	15.91	207.57
1987	9	9	6	5.03	13.64	231.53
1998	10	17	9	5.02	16.94	222.63
1981	2	4	9	5.01	15.94	221.18
1985	4	3	12	5.01	14.52	220.91
1999	9	16	18	5.01	15.82	222.80
2005	5	30	6	5.01	13.50	237.36
2008	10	31	3	5.01	18.77	213.66
1981	10	30	3	5.00	15.74	232.64
1982	4	20	9	5.00	19.06	215.49
1996	10	7	0	5.00	16.17	218.19
2009	10	14	9	5.00	16.00	205.16

Tabla 39: Tormentas clima extremo set de proyecciones RCP 4.5 mediados de siglo.

Año	Mes	Día	Hora	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2030	6	17	18	8.66	16.9492	271
2040	8	23	12	7.7	16.6667	260
2037	6	17	0	7.42	21.2766	220
2038	4	28	18	7.35	20.0000	237
2041	7	5	12	7.29	16.3934	263
2027	8	17	18	7.08	18.5185	229
2045	5	28	18	7.03	15.8730	254
2026	6	26	0	6.86	11.3636	334
2036	5	17	18	6.69	18.5185	248
2035	7	9	12	6.22	16.6667	244
2029	6	13	12	6.19	11.9048	307
2030	10	17	12	6.19	21.7391	218
2044	9	8	0	6.13	11.6279	325
2039	6	27	0	6.06	18.5185	231
2041	7	27	18	6.06	10.5263	345
2045	5	6	12	5.97	19.2308	224
2037	6	5	6	5.89	10.0000	342
2044	6	14	6	5.86	19.2308	233
2030	5	12	18	5.84	16.6667	249
2028	7	26	12	5.81	9.0909	346
2043	7	8	6	5.71	12.5000	257
2033	8	10	6	5.69	16.3934	259
2044	5	29	18	5.66	17.5439	219
2038	6	24	12	5.61	10.4167	353
2030	7	15	6	5.55	9.8039	346
2029	6	23	18	5.45	10.8696	307
2033	7	22	18	5.43	8.6957	332
2044	9	15	12	5.43	9.6154	330
2033	7	10	12	5.41	10.2041	344
2034	4	25	18	5.39	21.2766	231
2037	7	4	6	5.39	16.1290	243
2035	5	22	12	5.38	17.2414	231
2040	5	20	0	5.38	10.0000	339
2031	8	13	6	5.25	10.3093	351
2040	6	5	0	5.13	14.4928	243
2035	6	12	0	5.06	9.0090	331
2032	6	24	18	5.03	16.6667	250
2026	7	1	6	5.02	14.7059	249
2044	7	13	12	5.01	13.1579	242

Tabla 40: Tormentas clima extremo set de proyecciones RCP 8.5 mediados de siglo.

Año	Mes	Día	Hora	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2028	5	8	6	9.73	13.70	310
2036	7	1	6	7.69	14.49	296
2041	6	27	0	7.39	16.67	268
2037	6	18	12	7.13	12.20	322
2031	7	8	6	7.04	15.15	235
2032	8	12	18	6.94	10.64	343
2044	7	14	6	6.86	11.11	323
2036	8	7	0	6.54	13.33	282
2035	10	2	18	6.52	11.24	349
2030	7	12	0	6.38	10.75	327
2029	7	29	12	6.29	14.93	250
2037	5	20	0	6.18	15.15	270
2036	8	27	18	6.07	9.62	338
2038	8	7	12	5.93	19.61	249
2035	7	27	6	5.86	19.23	245
2040	9	14	18	5.72	13.51	293
2040	5	19	0	5.69	20.00	219
2026	6	19	0	5.66	16.95	243
2027	7	9	18	5.65	10.31	338
2038	9	25	6	5.60	18.18	223
2033	8	2	18	5.53	16.13	234
2028	4	20	0	5.48	18.18	224
2040	6	27	18	5.48	9.52	335
2039	7	12	0	5.47	13.70	266
2030	5	29	0	5.46	16.67	252
2027	8	19	12	5.44	18.52	242
2036	6	8	18	5.43	16.95	275
2026	7	12	6	5.37	17.86	242
2038	6	7	12	5.31	11.24	329
2036	5	20	0	5.24	17.24	258
2039	8	1	0	5.23	18.18	236
2036	7	16	6	5.20	12.82	234
2038	7	15	18	5.16	10.31	343
2028	6	7	12	5.13	9.35	329
2045	3	18	12	5.11	21.28	230
2041	5	12	18	5.07	16.67	225
2034	5	5	18	5.03	13.16	280
2034	7	4	12	5.03	19.61	226

Tabla 41: Tormentas clima extremo set de proyecciones RCP 4.5 finales de siglo.

Año	Mes	Día	Hora	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2081	9	3	12	5.48	17.86	215
2082	7	11	6	5.22	16.95	220
2083	9	29	12	5.41	15.38	260
2083	10	13	0	5.28	15.38	255
2084	4	30	18	5.44	9.71	341
2084	6	19	6	5.26	9.52	350
2084	8	13	18	5.13	16.13	250
2085	7	2	18	5.47	9.90	328
2087	6	4	6	5.09	12.82	263
2088	5	8	12	5.47	10.00	328
2088	9	19	12	5.22	9.62	350
2089	8	19	18	5.28	9.71	345
2091	6	27	18	5.30	17.54	251
2092	6	6	12	5.08	17.86	235
2093	7	1	6	5.20	12.35	295
2094	9	25	12	5.48	17.86	244
2095	8	12	0	5.13	12.50	287
2095	9	5	0	5.21	12.20	282
2097	6	30	0	5.40	15.87	235
2097	7	31	0	5.03	16.67	245
2098	7	5	6	5.37	10.42	309
2099	5	31	18	5.32	10.31	340
2100	7	8	6	5.48	18.18	240
2100	7	23	12	5.40	9.35	331
2100	8	19	6	5.26	16.95	261
2082	7	11	0	5.61	9.26	312
2082	8	29	0	8.84	12.82	332
2083	10	12	18	5.65	16.13	257
2087	6	3	18	7.10	10.53	343
2087	7	21	0	7.59	13.89	293
2088	5	8	18	6.21	11.36	324
2089	8	19	12	5.69	10.00	327
2092	4	21	6	7.12	16.67	241
2093	6	30	18	6.00	9.62	1
2093	7	1	0	7.09	11.49	343
2095	8	9	6	6.40	11.11	346
2095	9	4	18	5.75	10.31	327
2097	7	30	18	5.84	17.24	253
2097	8	27	0	5.67	9.80	339
2098	7	5	18	8.14	18.18	248
2099	6	18	0	5.84	10.10	326
2100	7	8	12	6.38	17.86	242
2100	7	24	0	6.22	16.67	247

Tabla 42: Tormentas clima extremo set de proyecciones RCP 8.5 finales de siglo.

Año	Mes	Día	Hora	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2100	7	5	18	9.93	15.15	261
2096	10	13	6	8.42	12.66	327
2084	7	3	18	6.67	9.62	342
2089	7	15	12	6.51	10.87	322
2085	8	30	6	6.23	18.18	259
2082	7	21	6	6.21	10.75	321
2084	8	16	12	6.04	17.54	254
2086	8	20	0	6.04	16.67	262
2096	9	28	12	6.01	18.52	253
2096	5	6	12	5.98	10.42	326
2086	8	6	0	5.85	10.75	341
2093	6	13	12	5.79	18.52	244
2098	8	31	6	5.76	19.61	230
2096	10	5	18	5.72	9.80	326
2096	7	18	12	5.71	9.62	342
2083	6	19	0	5.66	14.49	271
2083	7	11	6	5.62	16.95	239
2083	5	25	6	5.53	15.63	231
2091	5	27	18	5.47	9.17	339
2098	7	18	12	5.40	15.38	259
2087	5	17	6	5.34	16.67	236
2087	6	11	6	5.30	16.67	250
2088	7	30	12	5.28	18.52	265
2082	9	28	6	5.21	16.39	246
2090	5	9	0	5.13	9.43	332
2091	6	6	18	5.11	14.29	258
2092	8	29	18	5.08	16.67	241
2082	6	30	18	5.06	16.67	250
2093	7	5	18	5.06	9.90	335
2089	8	30	6	5.04	7.94	334
2095	6	19	18	5.02	15.87	237
2090	6	27	0	5.01	16.13	245
2095	9	24	0	5.01	16.39	234

En la Ilustración 74, Ilustración 76 e Ilustración 78 se presentan los periodos de las alturas significativas de las tormentas seleccionadas para el análisis de clima extremo, obtenidos mediante la ecuación (1). En la Ilustración 75, Ilustración 77 e Ilustración 79 se exponen las direcciones de las tormentas seleccionadas para realizar el análisis de clima extremo. En cada una de las ilustraciones de dirección se impone una línea de tendencia, con la finalidad de obtener las direcciones que más se presentan dentro de cada uno de los sets de tormentas seleccionadas para el análisis de clima extremo.

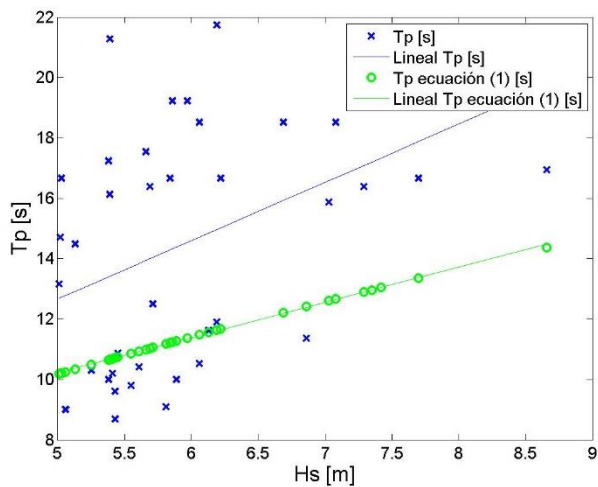


Ilustración 74: Periodos de alturas significativas clima extremo RCP 4.5 mediados de siglo.

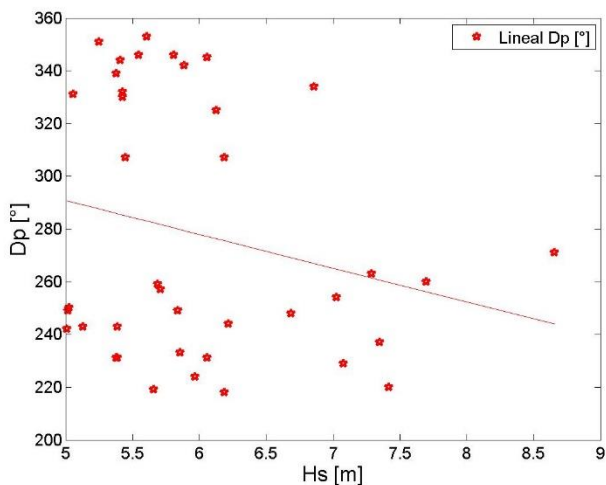


Ilustración 75: Direcciones de alturas significativas clima extremo RCP 4.5 mediados de siglo.

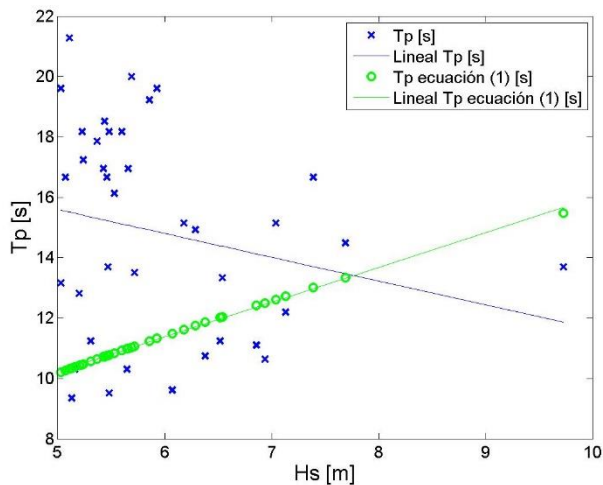


Ilustración 76: Periodos de alturas significativas clima extremo RCP 8.5 mediados de siglo.

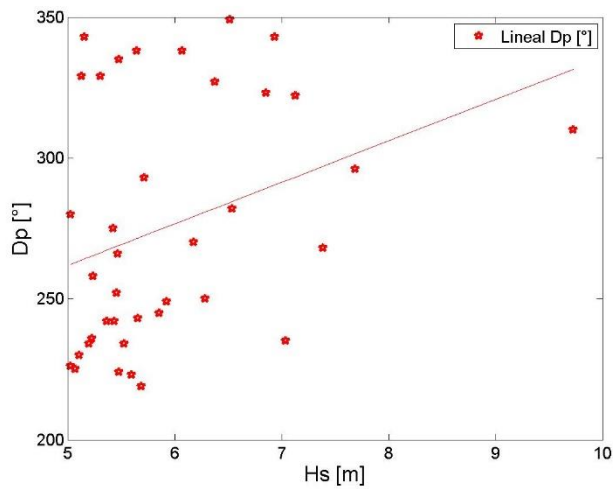


Ilustración 77: Direcciones de alturas significativas clima extremo RCP 8.5 mediados de siglo.

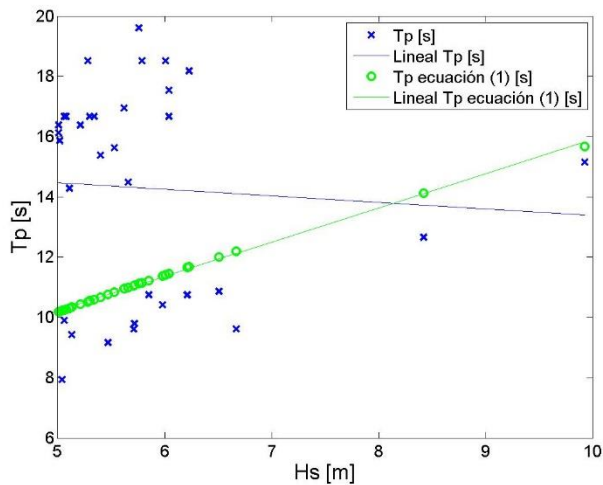


Ilustración 78: Periodos de alturas significativas clima extremo RCP 8.5 finales de siglo.

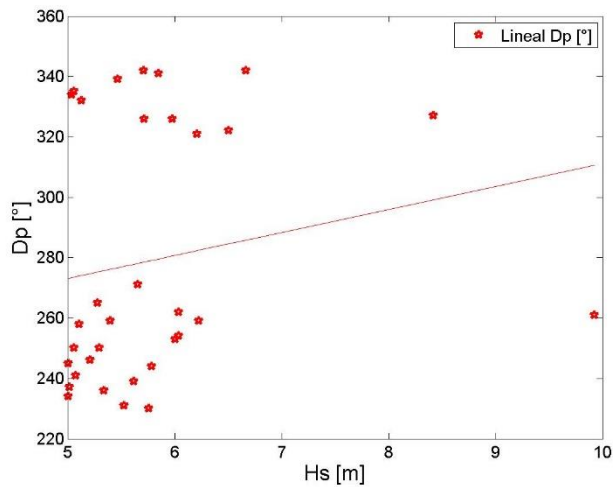


Ilustración 79: Direcciones de alturas significativas de clima extremos RCP 8.5 finales de siglo.

11.3 CLIMA MEDIO

Desde la Tabla 43 a la Tabla 52 se presentan los parámetros medios mensuales del oleaje propagados hasta los 10 [m] de profundidad de los cuatro sets de proyecciones para los escenarios RCP, se incluyen las propagaciones del set de datos históricos.

Tabla 43: Alturas significativas y direcciones set de datos históricos.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total	
	[0 - 0.5[	[0.5-1.0[	[1.0-1.5[	[1.5-2.0[	[2.0-2.50[	[2.5-3.0[	[3.0-3.5[	[3.5-4.0[	>= 4.0		
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	15.86	9.14	2.42	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.96
NNW	58.60	13.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71.77
Total	74.46	22.31	2.42	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.73

Tabla 44: Periodos y direcciones set de datos históricos.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total	
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27		
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	0.00	0.00	0.00	26.34	1.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27.96
NNW	0.00	0.00	2.69	69.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71.77
Total	0.00	0.00	2.69	95.43	1.61	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.73

Tabla 45: Alturas significativas y direcciones RCP 4.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total	
	[0 - 0.5[	[0.5-1.0[	[1.0-1.5[	[1.5-2.0[	[2.0-2.50[	[2.5-3.0[	[3.0-3.5[	[3.5-4.0[	>= 4.0		
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	13.33	36.25	23.75	15.83	3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.92
NNW	5.42	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.67
Total	18.75	37.50	23.75	15.83	3.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Tabla 46: Periodos y direcciones RCP 4.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total	
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27		
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	0.00	0.00	0.83	41.67	50.00	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	92.92
NNW	0.00	0.00	0.00	6.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.67
Total	0.00	0.00	0.83	48.33	50.00	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Tabla 47: Alturas significativas y direcciones RCP 8.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total	
	[0 - 0.5[	[0.5-1.0[	[1.0-1.5[	[1.5-2.0[	[2.0-2.50[	[2.5-3.0[	[3.0-3.5[	[3.5-4.0[	>= 4.0		
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	12.50	39.17	16.67	18.75	5.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.92
NNW	5.42	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.67
Total	17.92	40.42	16.67	18.75	5.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Tabla 48: Periodos y direcciones RCP 8.5 mediados de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total	
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27		
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	0.00	0.00	0.42	43.33	49.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	92.92
NNW	0.00	0.00	0.00	6.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.67
Total	0.00	0.00	0.42	50.00	49.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Tabla 49: Alturas significativas y direcciones RCP 4.5 finales de siglo.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total	
	[0 - 0.5[	[0.5-1.0[	[1.0-1.5[	[1.5-2.0[	[2.0-2.50[	[2.5-3.0[	[3.0-3.5[	[3.5-4.0[	>= 4.0		
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	15.42	35.83	18.75	18.75	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	93.75
NNW	5.00	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.83
Total	20.42	36.67	18.75	18.75	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Tabla 50: Periodos y direcciones RCP 4.5 finales de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27	
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	0.00	0.00	0.00	46.25	47.50	0.00	0.00	0.00	0.00	93.75
NNW	0.00	0.00	0.00	5.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.83
Total	0.00	0.00	0.00	52.08	47.50	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Tabla 51: Alturas significativas y direcciones RCP 8.5 finales de siglo.

Rango direcciones	Rango alturas significativas [m]									Total
	[0 - 0.5[	[0.5-1.0[	[1.0-1.5[	[1.5-2.0[	[2.0-2.50[	[2.5-3.0[	[3.0-3.5[	[3.5-4.0[	>= 4.0	
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	27.08	28.33	15.00	15.00	6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	91.67
NNW	6.25	1.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.92
Total	33.33	30.00	15.00	15.00	6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Tabla 52: Periodos y direcciones RCP 8.5 finales de siglo.

Rango direcciones	Rango de periodos [s]									Total
	[3 - 6[	[6 - 9[	[9-12[	[12-15[	[15-18[	[18-21[	[21-24[	[24-27[	>=27	
N	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WSW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
WNW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NW	0.00	0.00	0.00	39.58	52.08	0.00	0.00	0.00	0.00	91.67
NNW	0.00	0.00	0.00	7.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.92
Total	0.00	0.00	0.00	47.50	52.08	0.00	0.00	0.00	0.00	99.58

Desde la Tabla 53 a la Tabla 57 se presenta los parámetros medios anuales del oleaje, propagados hasta una profundidad de 10 [m]. Las tablas exponen las proyecciones de los cuatro escenarios RCP y los datos históricos.

Tabla 53: Promedios anuales de parámetros del oleaje propagados datos históricos.

Año	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
1979	0.29	13.31	327.38
1980	0.43	13.14	327.02
1981	0.34	13.84	326.94
1982	0.36	13.78	326.93
1983	0.53	14.21	326.00
1984	0.32	13.66	327.11
1985	0.37	13.55	327.15
1986	0.39	13.24	327.23
1987	0.46	13.67	326.69
1988	0.30	13.54	327.45
1989	0.30	14.17	326.54
1990	0.28	13.75	327.28
1991	0.34	13.26	327.53
1992	0.45	13.46	326.86
1993	0.38	13.62	327.30
1994	0.39	13.15	327.50
1995	0.38	13.14	327.32
1996	0.32	12.90	327.21
1997	0.44	12.98	326.35
1998	0.56	13.76	326.36
1999	0.40	13.36	327.17
2000	0.47	12.96	327.65
2001	0.33	13.02	327.49
2002	0.44	12.52	328.06
2003	0.40	13.07	327.31
2004	0.37	13.02	327.51
2005	0.38	12.99	327.46
2006	0.40	13.35	327.24
2007	0.29	13.21	327.67
2008	0.34	13.44	327.08
2009	0.30	13.10	328.02
Promedio	0.38	13.36	327.19

Tabla 54: Promedios anuales de parámetros del oleaje propagados escenario RCP 4.5 mediados de siglo.

Año	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2026	0.97	14.88	322.44
2027	0.90	14.71	323.72
2028	0.81	14.30	322.76
2029	1.01	14.94	322.24
2030	0.81	14.64	323.08
2031	0.89	14.55	322.02
2032	0.90	15.32	323.08
2033	0.92	14.81	323.05
2034	1.04	14.66	321.55
2035	0.92	15.23	323.63
2036	0.88	15.18	323.48
2037	0.95	14.76	323.24
2038	0.86	14.88	322.99
2039	0.81	14.96	324.25
2040	1.00	15.19	321.07
2041	0.90	14.75	323.04
2042	1.01	15.40	321.62
2043	0.85	15.03	323.24
2044	1.12	15.06	321.99
2045	0.98	14.94	321.72
Promedio	0.93	14.91	322.71

Tabla 55: Promedios anuales de parámetros del oleaje propagados escenario RCP 8.5 mediados de siglo.

Año	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2026	0.92	14.71	322.63
2027	1.05	14.90	322.74
2028	0.99	14.61	322.61
2029	0.97	14.88	323.15
2030	0.88	14.91	323.27
2031	0.93	15.14	323.42
2032	0.91	14.76	322.05
2033	0.91	15.22	322.92
2034	0.85	14.85	323.65
2035	1.08	14.83	321.73
2036	1.13	15.00	322.16
2037	0.85	14.81	323.59
2038	0.90	14.83	322.13
2039	0.95	15.06	323.61
2040	0.93	14.97	322.86
2041	0.90	14.62	323.23
2042	1.03	15.05	322.80
2043	1.08	15.03	322.89
2044	1.09	15.23	322.67
2045	1.01	14.81	321.46
Promedio	0.97	14.91	322.78

Tabla 56: Promedios anuales de parámetros del oleaje propagados escenario RCP 4.5 finales de siglo.

Año	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2081	0.98	14.55	322.34
2082	1.10	15.17	321.93
2083	1.07	15.19	322.62
2084	1.04	15.26	321.68
2085	0.98	15.10	323.13
2086	0.95	14.99	323.37
2087	0.93	14.83	322.87
2088	0.90	14.78	322.92
2089	0.89	14.87	322.51
2090	0.98	14.82	323.18
2091	1.08	14.82	322.53
2092	0.97	15.08	322.75
2093	1.01	15.05	321.96
2094	0.88	14.59	324.14
2095	1.09	14.81	321.98
2096	0.97	14.94	323.52
2097	1.00	14.78	323.13
2098	0.89	14.81	322.84
2099	0.96	14.44	322.83
2100	0.97	14.69	322.81
Promedio	0.98	14.88	322.75

Tabla 57: Promedios anuales de parámetros del oleaje propagados escenario RCP 8.5 finales de siglo.

Año	Hs [m]	Tp [s]	Dp [°]
2081	0.80	14.99	324.05
2082	0.81	14.63	322.98
2083	1.08	14.92	322.18
2084	0.81	14.95	323.46
2085	0.78	14.90	324.28
2086	0.84	14.72	322.25
2087	0.99	15.10	323.80
2088	0.83	14.88	323.95
2089	1.01	15.06	323.47
2090	0.99	14.84	323.53
2091	0.96	14.82	322.09
2092	0.87	15.24	322.49
2093	0.91	15.21	322.03
2094	0.84	15.02	324.09
2095	0.75	15.28	324.16
2096	1.01	14.91	322.28
2097	0.89	14.97	323.48
2098	0.89	15.31	323.41
2099	0.83	15.01	324.05
2100	0.77	14.44	323.67
Promedio	0.88	14.96	323.29

11.4 MAREA ASTRONÓMICA

En la Ilustración 80, Ilustración 81 e Ilustración 82 se presentan los resultados del análisis de marea armónica. Todos los niveles de marea están referidos al NRS.

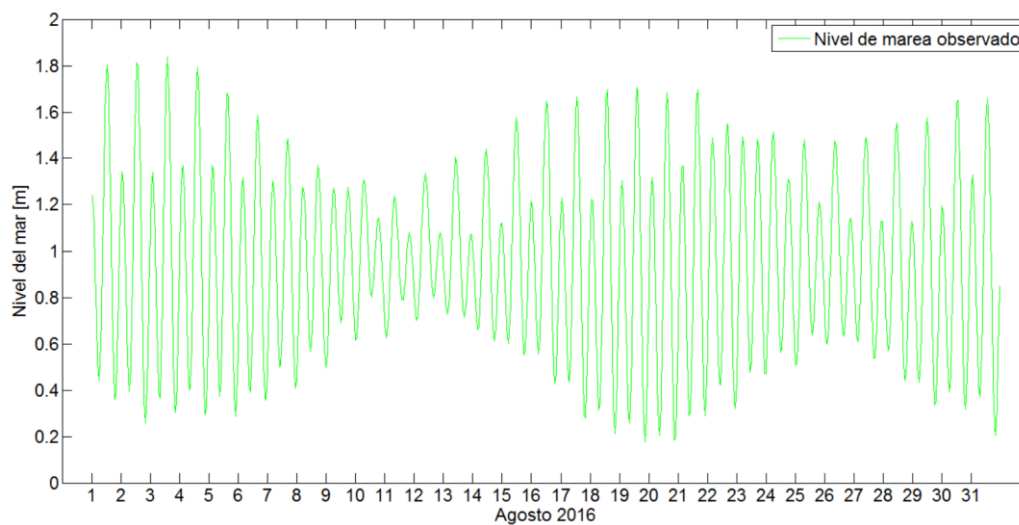


Ilustración 80: Nivel de marea observada.

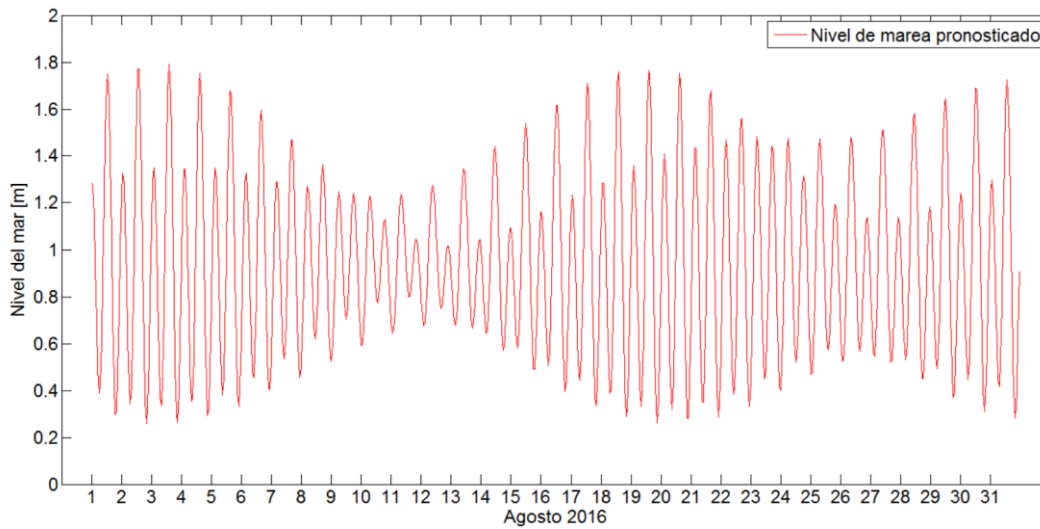


Ilustración 81: Nivel de marea pronosticada.

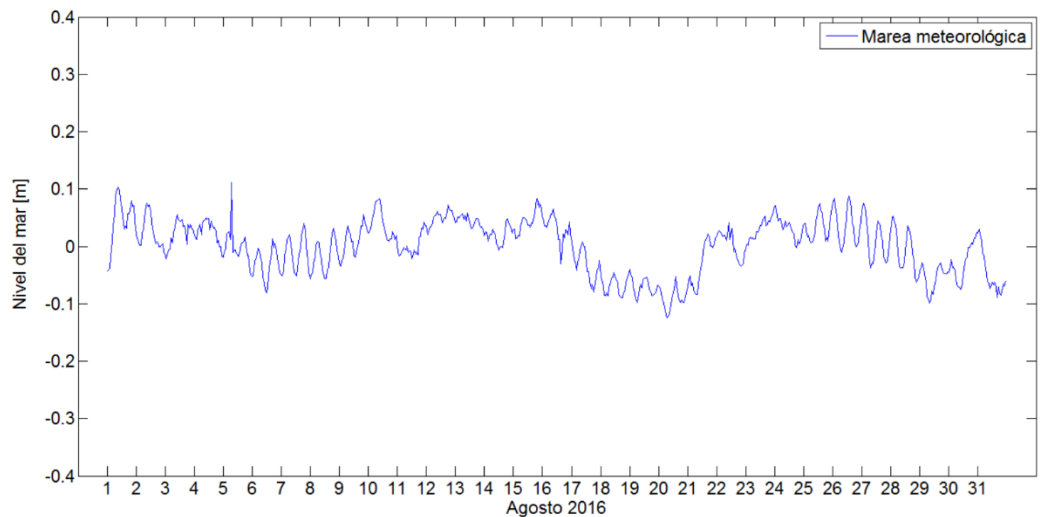


Ilustración 82: Marea meteorológica.

11.5 IMPULSORES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

La superficie de la tierra, junto con la composición de la atmósfera se ven modificadas por la actividad humana. Algunas de estas variaciones tienen una repercusión directa o indirecta en el balance energético de la tierra y son, por ende, impulsores del cambio climático. Para cuantificar la variación del balance energético de la tierra como resultado de un cambio externo se utilizan los conceptos de forzamiento radiativo y forzamiento radiativo efectivo (Stocker *et al.*, 2013). Cuando el valor del forzamiento radiativo es positivo se produce un calentamiento, y cuando es negativo conduce a un enfriamiento. El forzamiento

radiativo se expresa en W/m^2 y es definido en el Quinto Informe de Evaluación del IPCC como:

“La variación del flujo ascendente neto (onda corta más onda larga) en la tropopausa, tras permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten hasta alcanzar el equilibrio radiativo mientras se mantienen fijas otras variables de estado, como las temperaturas troposféricas, el vapor de agua y la cubierta de nubes” (Stocker et al., 2013, pág. 53).

Mientras que el forzamiento radiativo efectivo es utilizado para cuantificar el impacto de ciertos agentes de forzamiento que efectúan ajustes rápidos a ciertos componentes de la atmósfera y la superficie, considerados constantes según la definición de forzamiento radiativo efectuada anteriormente. Los ajustes rápidos son posibles en todos los componentes de la atmósfera a excepción de la temperatura media global en superficie, la temperatura de los océanos y la cobertura de hielo marino (Stocker et al., 2013).

En general, el forzamiento radiativo total posee un signo positivo, lo que ha dado lugar a la absorción de energía por el sistema climático. La principal contribución al forzamiento radiativo es el aumento de las concentraciones atmosféricas de CO_2 . En el año 2011 el forzamiento radiativo antropógeno total fue de 2.29 [1.13 a 3.33]¹⁵ W/m^2 , esto en relación al año 1750, lo que equivale a un 43% más de lo previsto en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC para el año 2005. Este crecimiento se debe principalmente al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero y a estimaciones del forzamiento radiativo de los aerosoles más precisas, estimaciones que señalan un efecto de enfriamiento neto más débil (Stocker et al., 2013).

11.5.1 FORZAMIENTO RADIATIVO DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

Durante la era industrial el principal contribuyente en los cambios de las concentraciones de gases de efecto invernadero homogéneamente mezclados fueron las emisiones antropógenas (Stocker et al., 2013).

El forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero es bien definido debido a que las concentraciones de este tipo de gases se basan en mediciones directas, en registros de los núcleos de hielo y a eso se suma que las propiedades radiativas de este tipo de gases son bien conocidas (Stocker et al., 2013).

El forzamiento radiativo correspondiente al CO_2 durante la era industrial fue de 1.82 [1.63 a 2.01] W/m^2 , este dato incluye aquellas emisiones de otros gases que contienen carbono, las cuales también contribuyen al aumento de las concentraciones de CO_2 . Si solo se consideran las emisiones de CO_2 , el forzamiento radiativo es de 1.68 [1.33 a 2.03] W/m^2 . Durante los últimos quince años el CO_2 ha sido el componente que más ha aportado al aumento del forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero homogéneamente mezclados (Stocker et al., 2013).

El segundo elemento que más ha contribuido al forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero es el metano (en adelante CH_4). Con un forzamiento radiativo de 0.97 [0.74 a

¹⁵ Los valores entre corchetes representan un intervalo de confianza del 90%.

1.2] W/m^2 , valor superior al estimado en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC el cual era de 0.48 [0.38 a 0.58] W/m^2 . Esta diferencia en las estimaciones es debida a las variaciones en las concentraciones del ozono, al vapor de agua en la estratósfera y a otros gases que afectan de forma indirecta a las concentraciones de CH_4 (Stocker *et al.*, 2013).

Otro de los gases de efecto invernadero más predominante es el óxido de nitrógeno (N_2O) atmosférico, el cual ha aumentado un 6% desde el Cuarto Informe de Evaluación, lo que equivale a 0.17 [0.14 a 0.20] W/m^2 , estas concentraciones siguen en aumento. Con respecto al tercer gas de efecto invernadero homogéneamente mezclado que más contribuye al forzamiento radiativo es el diclorodifluorometano (CF_2Cl_2 , CFC – 12). Sin embargo, las concentraciones de este gas están disminuyendo gracias al Protocolo de Montreal, por lo que en la actualidad y desde el Cuarto Informe de Evaluación, el tercer gas de efecto invernadero homogéneamente mezclado que más aporta al forzamiento radiativo es el N_2O (Stocker *et al.*, 2013).

Existe un nivel de confianza alto en que en el último decenio el forzamiento radiativo derivado de los gases de efecto invernadero homogéneamente mezclados ha sido menor con respecto a las décadas de 1960 y 1970. Esto debido al aumento más lento del forzamiento radiativo que han experimentado gases distintos del CO_2 (Stocker *et al.*, 2013).

El Ozono (O_3) junto con el vapor de agua estratosférico también son considerados gases de efecto invernadero, por lo que contribuyen al forzamiento antropógeno. Existe un nivel de confianza alto en que el aumento del forzamiento radiativo debido al O_3 es de 0.35 [0.15 a 0.55] W/m^2 , con un forzamiento radiativo derivado del O_3 troposférico de 0.50 [0.30 a 0.70] W/m^2 y un forzamiento radiativo debido al O_3 estratosférico de -0.15 [-0.30 a 0.00] W/m^2 . El aumento del O_3 troposférico se debe principalmente al aumento de las emisiones de CH_4 , de monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles y N_2O . Existe evidencia sólida de que el O_3 troposférico afecta negativamente a la fisiología de la vegetación, y, por ende, disminuye la absorción de CO_2 . Por lo que se debe considerar como un agente indirecto en el aumento de las concentraciones de CO_2 en la atmósfera. Se tiene que tener en cuenta que el O_3 es emitido a la atmósfera mediante reacciones fotoquímicas y no directamente (Stocker *et al.*, 2013).

11.5.2 FORZAMIENTO RADIATIVO DERIVADO DE LOS AEROSOLES ANTROPÓGENOS

Los modelos y las observaciones en relación a los aerosoles antropógenos indican que estos han producido un efecto de enfriamiento en la tierra, aproximadamente desde la era preindustrial, lo que ha disimulado parte del calentamiento medio global provocado por los gases de efecto invernadero (Stocker *et al.*, 2013).

Los aerosoles antropógenos pueden influir en el forzamiento radiativo climático mediante diferentes procesos que son agrupados en: interacciones aerosol-radiación e interacción aerosol-nube. En la actualidad aún existen numerosas incertidumbres en las evaluaciones de las tendencias a largo plazo del espesor óptico global y otras propiedades globales de los aerosoles, esto se debe a la dificultad de realizar mediciones, a los pocos registros de observaciones de algunos parámetros importantes y la alta variabilidad espacial y temporal. Sin embargo, existe un nivel de confianza alto en la estimación del forzamiento radiativo

antropógeno por interacciones aerosol-radiación, el cual es -0.35 [-0.85 a $+0.15$] W/m^2 (Stocker *et al.*, 2013).

Las estimaciones del forzamiento radiativo inducido por el carbono negro sobre la nieve y el hielo, es de 0.04 [0.02 a 0.09] W/m^2 . Este dato incluye los efectos en el hielo marino y toma en cuenta datos derivados de modelos y observaciones. Se debe tener en consideración que el forzamiento radiativo del carbono negro provoca una variación en la temperatura media global en superficie de entre dos a cuatro veces mayor por unidad que la del forzamiento del CO_2 , debido a que toda la energía del forzamiento radiativo del carbono negro se deposita directamente en la criósfera (Stocker *et al.*, 2013).

11.5.3 FORZAMIENTO RADIATIVO DEBIDO LOS CAMBIOS EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

Existe evidencia sólida de que el albedo de la superficie terrestre ha aumentado debido a los cambios antropógenos en el uso del suelo, como la deforestación, lo que ha inducido un forzamiento radiativo de -0.15 [-0.20 a -0.05] W/m^2 . Además de que los cambios en el uso del suelo afecten al albedo de la superficie terrestre también modifican la temperatura y rugosidad de la superficie, el flujo de calor latente, la escorrentía fluvial y el riego (Stocker *et al.*, 2013).

11.5.4 FORZAMIENTO RADIATIVO DERIVADO DE LOS IMPULSORES NATURALES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Los impulsores naturales del cambio climático de la era industrial son el forzamiento solar y el volcánico (Stocker *et al.*, 2013).

Los datos de la irradiación solar total desde 1978, obtenidos mediante observaciones satelitales, muestran una variación cíclica con un período aproximado de 11 años. Las estimaciones de los patrones a largo plazo se realizan comparando mínimos solares, durante los cuales la variabilidad es menor. De esta forma, el forzamiento radiativo es de -0.04 [-0.08 a 0.00] W/m^2 entre el mínimo más reciente, año 2008, y el mínimo de 1986. Se debe tener en cuenta que antes del inicio de las observaciones satelitales, las tendencias seculares de la irradiación solar se basaban en datos indirectos, por lo que existe un nivel de confianza medio, que durante la era industrial el forzamiento radiativo debido a los cambios de la irradiación solar total fueron de 0.05 [0.00 a 0.10] W/m^2 . Esta estimación es notoriamente inferior a la del Cuarto Informe de Evaluación debido a que se incluyó el último ciclo solar y a los precarios procedimientos de estimación del forzamiento radiativo solar en evaluaciones anteriores al IPCC (Stocker *et al.*, 2013).

Las erupciones volcánicas introducen partículas minerales y gas de dióxido de azufre (SO_2) a la atmósfera, pero es este último el que contribuye al forzamiento radiativo que afecta el clima, debido a su pequeño tamaño, al largo período de vida y a la reacción que posee este gas con el agua, ya que al mezclarse forman nubes de gotas de ácido sulfúrico. Estas nubes tienen la propiedad de reflejar la luz del sol hacia el espacio provocando un enfriamiento de la superficie de la tierra. Las erupciones volcánicas también emiten CO_2 , sin embargo, estas emisiones son al menos 100 veces inferiores a las emisiones antropógenas y no generan secuelas en el clima a escalas seculares (Stocker *et al.*, 2013).

La última erupción volcánica importante fue la registrada en 1991 en el monte Pinatubo, Filipinas, la cual provocó un forzamiento radiativo de -3.0 W/m^2 en un año, inyectó unos 20 millones de toneladas de SO_2 provocando un enfriamiento de la tierra de unos $0,5^\circ\text{C}$ durante un año. Durante el período 2008-2011 han ocurrido pequeñas erupciones volcánicas que han causado un forzamiento radiativo de -0.11 [-0.15 a -0.08] W/m^2 (Stocker *et al.*, 2013).

11.6 CICLO DEL DIÓXIDO DE CARBONO

Una vez que el CO_2 es emitido a la atmósfera, se distribuye rápidamente en ésta, en la capa superior del océano y en la vegetación. Luego de esto el carbono se desplaza hacia los diversos reservorios del ciclo del carbono global, como suelos, las profundidades del océano y las rocas. Dependiendo de la cantidad de CO_2 liberado un rango de entre un 15 y un 40% permanece en la atmósfera durante 2000 años, para luego establecerse un nuevo balance entre la biosfera terrestre, el océano y la atmósfera. A diferencia de otros compuestos químicos reactivos presentes en la atmósfera, el CO_2 es muy poco reactivo, por lo que no se elimina o descompone mediante procesos de hundimiento como el metano, sino que, se redistribuye en los diferentes reservorios del ciclo del carbono para luego volver a la atmósfera en una gran versatilidad de escalas temporales (Stocker *et al.*, 2013).

En la Ilustración 83 se presenta un esquema simplificado del ciclo del carbono global y sus escalas temporales de renovación de las transferencias de carbono mediante los principales reservorios.

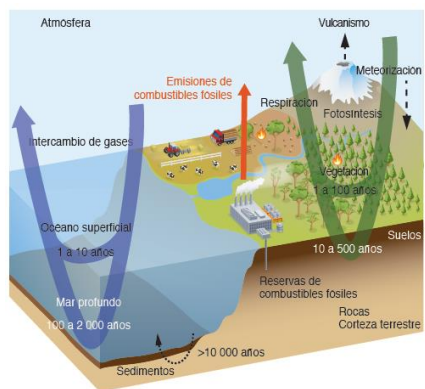


Ilustración 83: Esquema simplificado del ciclo del carbono global.
Fuente: (IPCC, 2013).

Una mayor emisión de carbono proveniente principalmente de fuentes antropógenas aumenta el traspaso de moléculas de CO_2 del aire al mar. Como resultado de este proceso las aguas superficiales del océano alcanzan un equilibrio con la atmósfera en el transcurso de uno o dos años. Sin embargo, el paso del carbono desde las aguas superficiales hacia aguas más profundas lleva más tiempo, entre decenios y muchos siglos (Stocker *et al.*, 2013).

El proceso de absorción de carbono por la vegetación es llevado a cabo mediante la fotosíntesis. Proceso por el cual el carbono absorbido es convertido en materia orgánica.

Un porcentaje de este carbono absorbido es devuelto a la atmósfera de forma inmediata mediante la respiración de las plantas, mientras que el resto es utilizado por las mismas para su crecimiento. Un mayor aumento de CO₂ en la atmósfera provoca una intensificación en la fotosíntesis, y, por tanto, una mayor incorporación de carbono (Stocker *et al.*, 2013).

A medida que el clima global se calienta tanto el océano como la tierra incorporan una menor cantidad de carbono, lo que establece una retroalimentación positiva. Este fenómeno es consecuencia de muchos procesos distintos. Uno de ellos es la menor incorporación de CO₂ atmosférico en el océano, debido a una menor solubilidad de CO₂ generada por el aumento de la temperatura del agua (Stocker *et al.*, 2013).

11.7 RETROALIMENTACIONES DEL CLIMA

La retroalimentación se define como:

“Interacción en la que una perturbación en una magnitud climática causa un cambio en una segunda magnitud, y el cambio en esta conduce en última instancia a un cambio añadido en la primera magnitud” (Stocker *et al.*, 2013, pág. 18).

En el contexto de este proyecto de título la retroalimentación se refiere a la perturbación de la temperatura media global en superficie, la que a su vez induce cambios en el balance de radiación global. Cuando se produce un reforzamiento o una atenuación en el aumento previsto de la temperatura se habla de una retroalimentación positiva o de una retroalimentación negativa, respectivamente (Stocker *et al.*, 2013).

Las retroalimentaciones del albedo de nieve y hielo son positivas, y, es sumamente probable que la retroalimentación de la combinación del vapor de agua y del gradiente vertical (diferencia entre el calentamiento de la atmósfera y la superficie) también sea positiva. En cuanto a la retroalimentación de las nubes es probable que sea positiva. Las incertidumbres sobre el signo de esta retroalimentación se deben a las incertezas que se tienen con respecto al impacto del calentamiento en las nubes bajas (Stocker *et al.*, 2013).

La retroalimentación del ciclo del carbono es positiva y existe un nivel de confianza alto en que la retroalimentación ocasionada por el deshielo del permafrost también sea positiva. El deshielo puede provocar la descomposición del carbono (CO) o el CH₄ acumulado en los suelos congelados, aumentando las concentraciones de dichos gases en la atmósfera. Debido al calentamiento antropógeno es posible que se potencien las emisiones de CH₄ procedentes de clatratos terrestres y oceánicos, ya que los depósitos de clatratos de CH₄ ubicados en el fondo del océano se pueden ver desestabilizados a causa del calentamiento del océano. Sin embargo, la elevación del nivel medio del mar debido a los cambios en la masa de agua mejora la estabilidad de dichos clatratos. Existe un nivel de confianza bajo en que durante el siglo XXI el permafrost será un emisor neto de carbono. El bajo nivel de confianza se debe a la escasa comprensión que se tiene en la actualidad de los procesos del suelo durante y después del deshielo del permafrost. Sin embargo, si se llegara a experimentar una liberación catastrófica de los clatratos de CH₄ ésta podría ser irreversible, ya que existe una diferencia notoria entre las escalas temporales de liberación y de acumulación (Stocker *et al.*, 2013).

11.8 CRONOGRAMA DE LAS NEGOCIACIONES E HITOS IMPORTANTES REFERENTES AL CAMBIO CLIMÁTICO

1979: Primera Conferencia Mundial sobre el Clima (en adelante CMC). En la cual se dieron las primeras pruebas de la injerencia humana en el clima (UNFCCC, 2014).

1998: La OMM y el PNUMA crearon el IPCC, con la finalidad de orientar y evaluar la información científica ligada al tema del cambio climático (UNFCCC, 2014).

1990: El IPCC y la segunda CMC solicitan un tratado mundial sobre el cambio climático. Durante este año el IPCC publica su primer Informe de Evaluación. Además, comienzan las negociaciones de la Asamblea de las Naciones Unidas para una convención marco. En este mismo año se realizó la segunda CMC en Ginebra, Suiza (UNFCCC, 2014).

1991: Se realiza la primera reunión del Comité Intergubernamental de Negociación (en adelante CIN), en la cual los representantes gubernamentales adoptaron la CMNUCC. En el mismo año se establece el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM) administrado por la CMNUCC cuyo objetivo fue financiar proyectos, de países en desarrollo, con repercusiones positivas para el medio ambiente mundial (UNFCCC, 2014).

1992: El CIN adopta el texto de la CMNUCC. Se celebra la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, Brasil (UNFCCC, 2014).

1994: Entra en vigor la CMNUCC, la cual divide a los países en tres grupos principales, dependiendo de sus diversos compromisos (UNFCCC, 2014) :

- Las Partes incluidas en el anexo I: Son aquellos países industrializados que en 1992 eran miembros de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (en adelante OCDE), más los países con economías en transición (en adelante PET). Los países incluidos en el anexo I son: Alemania, Australia, Austria, Belarús (PET), Bélgica, Bulgaria (PET), Canadá, Comunidad Europea, Croacia (PET), Dinamarca, Eslovaquia (PET), Eslovenia (PET), España, Estados Unidos de América, Estonia (PET), Federación Rusa (PET), Finlandia, Francia, Grecia, Hungría (PET), Irlanda, Islandia, Italia, Japón, Letonia (PET), Liechtenstein, Lituania (PET), Luxemburgo, Mónaco, Noruega, Nueva Zelanda, Países bajos, Polonia (PET), Portugal, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del norte, Rumania (PET), Suecia, Suiza, Turquía y Ucrania (PET). Estos países tenían la obligación de aportar con políticas y medidas relativas al cambio climático con la finalidad de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a los niveles de 1990 a más tardar el año 2000.
- Las Partes incluidas en el anexo II: Son aquellos países miembros de la OCDE incluidos en el anexo I, pero no los PET. Los cuales tienen la obligación de ofrecer recursos financieros para permitir a los países en desarrollo comenzar actividades de reducción de las emisiones y ayudarles a adaptarse a los efectos negativos del cambio climático.
- Las Partes no incluidas en el anexo I: En su mayoría son países en desarrollo y que son más vulnerables a los efectos negativos del cambio climático.

1995: Se celebra la primera Conferencia de las Partes (en adelante CP) en Berlín, Alemania, de esta conferencia se origina el Mandato de Berlín. El objetivo principal de las CP es impulsar, supervisar y continuar con las conversaciones sobre la forma más indicada de abordar el cambio climático. Las CP se realizan todos los años y son el máximo órgano responsable de la toma de decisiones de la CMNUCC (UNFCCC, 2014).

1997: Se adopta oficialmente el Protocolo de Kyoto en la CP 3 en Kyoto, Japón. Este protocolo esboza compromisos jurídicamente vinculantes de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (UNFCCC, 2014).

1998: En Noviembre de este año se realiza la CP 4 en Buenos Aires, Argentina. En la cual se origina el Plan de Acción de Buenos Aires, que contiene entre otras cosas, una vinculación de las negociaciones sobre las normas del Protocolo de Kyoto con conversaciones referentes a temas como el financiamiento y la transferencia de tecnología (UNFCCC, 2007).

2000: Se celebra la CP 6 en La Haya, Países Bajos (UNFCCC, 2007).

2001: Se publica el tercer informe de evaluación del IPCC, el cual aporta las pruebas científicas del calentamiento mundial más convincentes hasta la fecha. En este mismo año se adoptaron los acuerdos de Marrakech en la CP 7 celebrada en Marrakech, Marruecos, en la cual se detallan las reglas para poner en práctica el Protocolo de Kyoto. Además de esto, en la CP 7 se establecieron tres nuevos fondos de financiamiento, dos en el marco de la CMNUCC y uno en el del Protocolo de Kyoto, los cuales serían administrados por la FMAM. Estos fondos fueron: Un fondo especial para el cambio climático, el cual se encarga de financiar proyectos en áreas como el fomento de la capacitación, adaptación, mitigación, transferencia de tecnología (todas estas áreas ligadas al cambio climático), y para aquellos países que dependen de los ingresos derivados de combustibles fósiles, la diversificación económica; otro fondo para los países menos adelantados cuyo objetivo es brindar apoyo a la realización de actividades nacionales de adaptación; y el tercer fondo para los países en desarrollo, el cual está enfocado en financiar proyectos, programas de adaptación y respaldar actividades de fomento de la capacidad (UNFCCC, 2014).

2002: Se realiza la CP 8 en Nueva Delhi, India, en la cual se origina la Declaración de Delhi, que contiene, entre otras cosas, estrategias sobre el desarrollo sostenible y el cambio climático (UNFCCC, 2007).

2004: Se celebra la CP 10 en Buenos Aires, Argentina, en la cual se crea el Programa de Trabajo de Buenos Aires sobre Adaptación y Medidas de Respuesta (UNFCCC, 2007).

2005: Entra en vigor el Protocolo de Kyoto, el cual tiene como objetivo principal *“Estabilizar las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero en un nivel que evite injerencias peligrosas en el sistema climático”* (UNFCCC, 2007, pág. 26). En este protocolo se establecieron objetivos de emisiones jurídicamente vinculantes para los países industrializados, objetivos que se cumplirían mediante fijación de cuotas máximas de emisión por país, además se introdujeron tres mecanismos para un desarrollo limpio y de comercio de los derechos de emisión, estos son (UNFCCC, 2007):

- Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL): En este mecanismo las Partes incluidas en el anexo I pueden invertir en proyectos de reducción de las emisiones, o de forestación o reforestación en países en desarrollo, obteniendo a cambio créditos o derechos de emisión por la reducción o eliminación de emisiones conseguidas en los países en desarrollo.
- Aplicación conjunta: Al igual que el MDL, este también es un mecanismo basado en proyectos, en el cual las Partes incluidas en el anexo I ejecutan proyectos enfocados a reducir las emisiones o aumentar las absorciones, mediante sumideros, en otros países incluidos en el anexo I. Las unidades de reducción de emisiones que se produzcan con estos proyectos pueden ser luego utilizadas por las Partes inversoras para ayudarlas a cumplir con sus objetivos de emisiones.
- Comercio de los derechos de emisión: Este mecanismo permite a las Partes incluidas en el anexo I adquirir unidades de la cantidad atribuida de otras Partes, también incluidas en el anexo I, que pueden reducir de forma más fácil las emisiones, con la finalidad de cumplir sus objetivos de emisiones.

2006: Se adopta el Programa de Trabajo de Nairobi, en la CP 12 realizada en Nairobi, Kenia, en la cual se crea el Programa de Trabajo de Nairobi sobre Adaptación. El cual tuvo por objetivo permitir a las Partes evaluar y comprender de mejor forma los impactos, vulnerabilidades y adaptación frente al cambio climático. De igual forma capacitar a las Partes para la toma de decisiones sobre medidas prácticas de adaptación (UNFCCC, 2014).

2007: Es publicado el cuarto informe de evaluación (AR4) del IPCC (UNFCCC, 2014).

2009: Se realiza la CP 15 celebrada en Copenhague, Dinamarca, en la que se inicia la redacción del Acuerdo de Copenhague. En el cual los países presentan compromisos no vinculantes de reducción de las emisiones o promesas de medidas de mitigación (UNFCCC, 2014).

2010: Se establece el *Cancún Adaptation Framework* (CAF) en la CP16 realizada en Cancún, México. En el CAF se establecen las formulaciones de medidas de adaptación y su implementación a nivel nacional.

2010: Son redactados los Acuerdos de Cancún, los cuales son ampliamente aceptados por la CP 16. En estos acuerdos los países formalizan las promesas realizadas en Copenhague (UNFCCC, 2014).

11.9 VARIACIONES OBSERVADAS A NIVEL MUNDIAL DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

Debido a que este proyecto de título se basa en el diseño de una obra de abrigo, los cambios observados a nivel mundial, debido al cambio climático que se presentan a continuación son aquellos que tienen estrecha relación con los parámetros de diseño de obras costeras.

11.9.1 CAMBIOS EN EL NIVEL DEL MAR

Existe un nivel de confianza alto en que se ha producido una transición desde las tasas medias de elevación registradas en los últimos dos milenios hacia tasas más elevadas. Esta

transición ocurrió entre finales del siglo XIX y principios del XX (Stocker *et al.*, 2013). El cambio en el volumen de agua de los océanos se debe a las contribuciones de la expansión del agua en los mismos debido al calentamiento y a la transferencia del agua almacenada en tierra, las cuales proceden principalmente de glaciares y mantos de hielo.

Aproximadamente un 40% de la elevación del nivel del mar observado desde 1970 se debe a la expansión térmica. Los cambios en el nivel del mar también se ven afectados por actividades humanas, como el almacenamiento en reservorios y el vaciamiento de aguas subterráneas. Estas actividades han contribuido al menos con varias décimas de mm/año al cambio del nivel del mar. Los factores geofísicos también contribuyen a la variación del nivel del mar. Estos factores pueden ser subsidencias o ascensos de la tierra y el Ajuste Isostático Glacial (GIA por sus siglas en inglés), que es la respuesta del sistema tierra-océano a los cambios en la distribución del agua de los océanos y del hielo terrestre (Stocker *et al.*, 2013).

La estimación en la elevación del nivel medio global del mar durante el período 1901-2010 fue de 0.19 [0.17 a 0.21] mm/año. Este dato fue obtenido a partir de una tendencia lineal basada en los registros de mareógrafos y datos satelitales recopilados desde el año 1993. Detalladamente, el aumento de la tasa media del nivel del mar fue de 1.7 [1.5 a 1.9] mm/año en el período 1901-2010, de 2.0 [1.7 a 2.3] mm/año durante el período 1971-2010 y de 3.2 [2.8 a 3.6] mm/año entre los años 1993 y 2010 (Stocker *et al.*, 2013).

Las contribuciones de la pérdida de masa de los glaciares más la expansión térmica del océano son aproximadamente un 75% de la elevación registrada del nivel medio global del mar desde el año 1970. Detalladamente durante el período 1993-2010 la expansión térmica del océano ha contribuido con 1.1 [0.8 a 1.4] mm/año; las variaciones en los glaciares con 0.76 [0.39 a 1.13] mm/año; el manto de hielo de Groenlandia con 0.33 [0.25 a 0.49] mm/año; el manto de hielo de la Antártida con 0.27 [0.16 a 0.38] mm/año y el almacenamiento de agua en tierra con 0.38 [0.26 a 0.49] mm/año, sumando en total 2.8 [2.3 a 3.4] mm/año (Stocker *et al.*, 2013).

Las contribuciones de la expansión térmica de los océanos y de los glaciares de los modelos sumados y el cambio proyectado en el almacenamiento de agua en tierra representan cerca del 65% del aumento del nivel medio global del mar observado en el período 1901-1990 y del 90% para el período 1971-2010 y 1993 -2010 (Stocker *et al.*, 2013).

La Ilustración 84 muestra la comparación de la suma de las contribuciones observadas (en naranja) y el nivel del mar observado a partir de datos obtenidos por altímetros satelitales desde 1993 (en rojo). Las áreas sombreadas en la ilustración representan las estimaciones de incertidumbre.

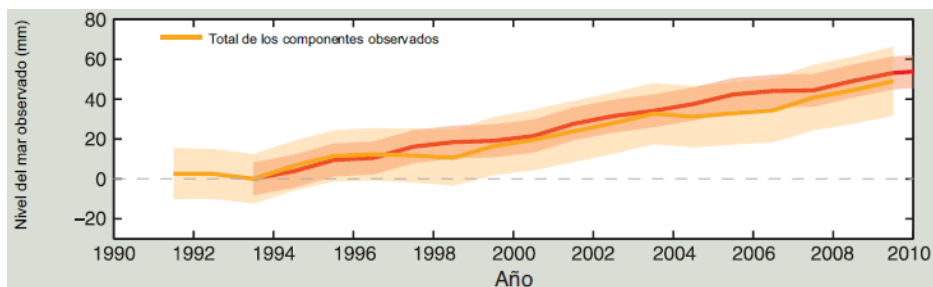


Ilustración 84: Contribuciones observadas en el nivel del mar.
Fuente: (IPCC, 2013).

En la Ilustración 85 se presentan las tasas de cambio de la altura de la superficie del mar. Es decir, el nivel del mar geocéntrico (altura de la superficie oceánica respecto del centro de la tierra), obtenidas mediante altimetría satelital. Las líneas grises presentes en los gráficos representan los cambios en el nivel del mar relativo de ciertas estaciones mareográficas durante el período 1950-2012. Las líneas rojas representan una estimación del cambio medio global del nivel del mar con la serie temporal de cada mareógrafo. Las grandes diferencias que se presentan en los gráficos se deben en gran medida a la variabilidad natural. Por ejemplo, en Pago Pago (Samoa) las grandes desviaciones regulares están asociadas al fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. En Estocolmo (Suecia) la disminución constante del nivel del mar se debe a la elevación de esta región después de la fusión de un manto de hielo continental de más de 1 kilómetro de espesor, hecho ocurrido hacia finales de la última edad de hielo, hace aproximadamente 20000 a 9000 años. En Charlottetown (Canadá) el aumento relativamente grande en comparación a la tasa media global se debe al movimiento vertical de la tierra, en este caso específico la subsidencia del terreno. La mayor tasa de aumento con respecto de la media global en Manila (Filipinas) es debida a la subsidencia del suelo provocada por un bombeo intensivo de agua subterránea. Mientras que en Antofagasta (Chile) ha existido una elevación constante de la tierra, provocado por la cercanía a la zona de subducción activa en la que se encuentra, donde una placa tectónica se hunde por debajo de otra, provocando un descenso relativo del nivel del mar.

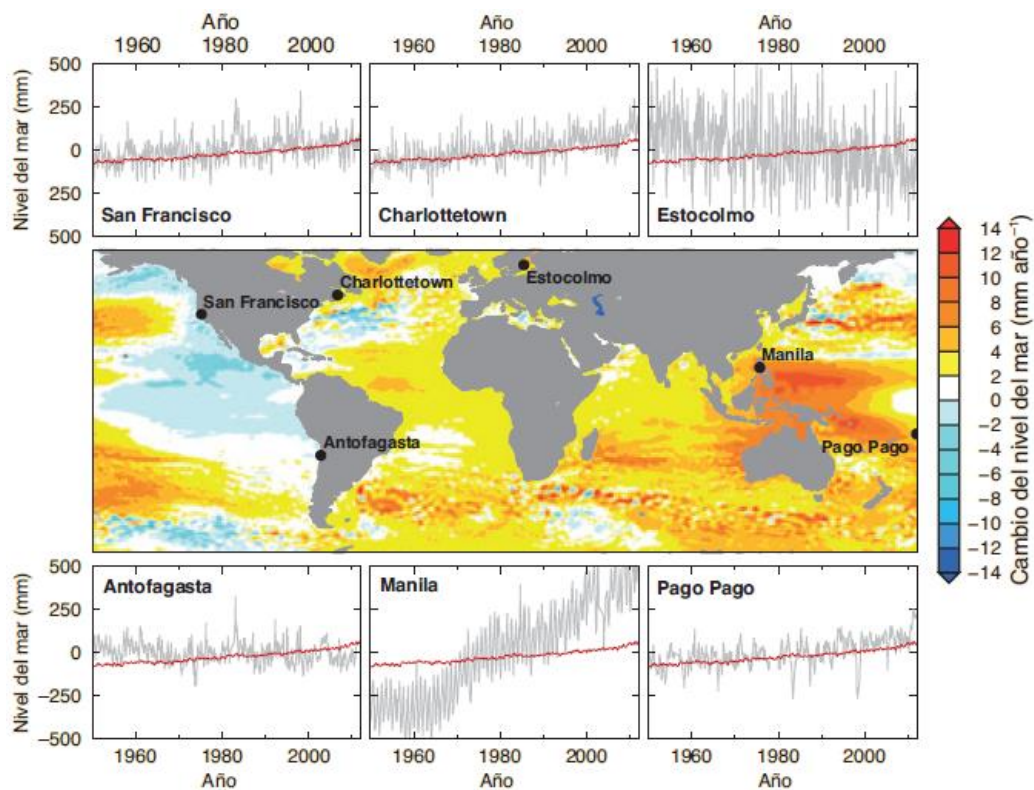


Ilustración 85: Mapa de las tasas de cambio del nivel del mar geocéntrico durante el período 1993-2012. Fuente: (IPCC, 2013).

11.9.2 CAMBIOS EN LOS VALORES EXTREMOS DE LOS OCÉANOS

Es probable que desde 1970 haya existido un aumento en la magnitud de los eventos de niveles de mar extremadamente altos, debido principalmente al aumento del nivel medio del mar. Tomando esto en consideración, los cambios en los niveles máximos del mar se reducen a menos de 5 mm/año en un 94% de las observaciones de mareógrafos. Existe un nivel de confianza medio que la altura de ola media significativa ha aumentado desde 1950, con una tendencia de crecimiento típica en invierno de 20 cm por decenio en áreas como el Atlántico Norte (al Norte de los 45°N) (Stocker *et al.*, 2013).

11.10 VARIACIONES OBSERVADAS EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE DEBIDO AL CAMBIO CLIMÁTICO

11.10.1 NIVEL MEDIO DEL MAR

En la Ilustración 86 se presenta la estacionalidad, es decir, las medias mensuales del nivel medio del mar. Los datos para la realización de la ilustración fueron obtenidos desde el centro CSIRO e integran el factor de los movimientos lentos y monótonos de la tierra (por ejemplo, el GIA) como uno de los responsables de la variación del nivel medio del mar, y no integran los movimientos rápidos e irregulares, como los movimientos de índole sísmica. Como se aprecia en la ilustración las mayores variaciones estacionales se presentan en la costa Norte de Brasil y la costa de Centroamérica del océano Pacífico (CEPAL, 2015).

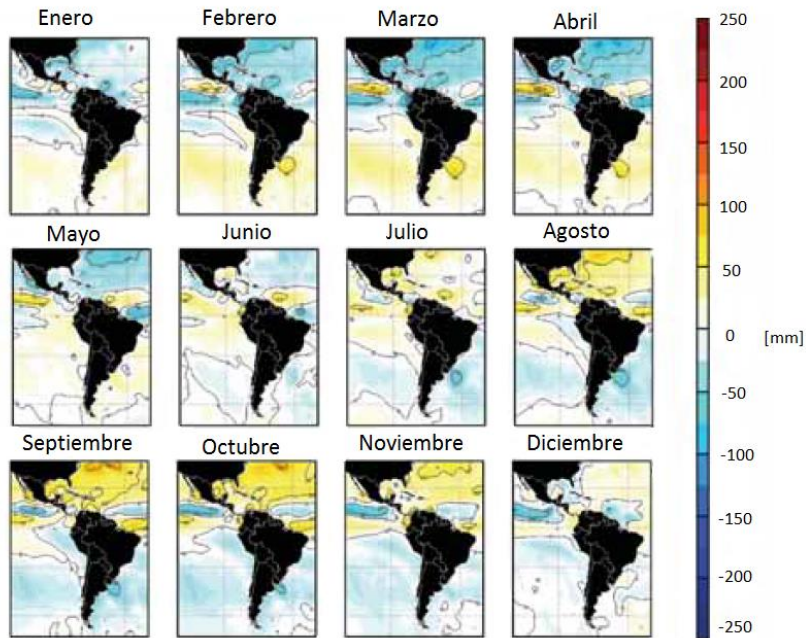


Ilustración 86: Estacionalidad del nivel medio del mar para América Latina correspondiente a dos períodos de tiempo, desde 1950 a 2001 y desde 1993 a 2001. Fuente: (CEPAL, 2015).

Los cambios observados en Chile de la variación del nivel medio del mar, en algunas estaciones del país se pueden apreciar en la Tabla 58. Se debe tener en consideración que esta variación con respecto al suelo marino está condicionada por la actividad sísmica que presenta el país debido a la zona de subducción, entre las placas Sudamericana y de Nazca, en la que se encuentra. Las variaciones presentadas en la Tabla 58 fueron realizadas con registros de mareógrafos de la red nacional del SHOA, situados en estructuras portuarias.

Tabla 58: Variación anual del nivel medio del mar en Chile.

Estación	Duración [años]	Fecha de inicio	Fecha de termino	Variación total [mm]	Variación anual [mm/año]
Arica	59	06-12-1950	31-12-2008	-82	-1.4
Antofagasta	64	06-12-1945	30-11-2008	-55	-0.9
Caldera	57	01-12-1950	30-11-2006	69	1.2
I. de pascua	51	16-01-1957	29-04-2008	162	3.2
Valparaíso	65	02-01-1944	29-04-2008	6	0.1
Talcahuano	60	01-08-1949	29-06-2008	88	1.5
Pto. Williams	40	04-11-1964	01-04-2005	90	2.2

Fuente: (Contreras *et al.*, 2012).

11.10.2 OLEAJE

Las ilustraciones que se presentan en este subcapítulo fueron desarrolladas con simulación numérica del reanálisis de oleaje *Global Ocean Waves* (en adelante GOW).

En la Ilustración 87 se aprecia que las alturas significativas medias en México están en torno a los 2 metros. En las islas del Caribe alcanzan 1 [m] en aguas interiores y entre 1.6 a 2 [m] en la costa atlántica, el Norte del Golfo de México y la costa Norte de Panamá y Costa Rica. También se aprecia la gran variación estacional que poseen las alturas de olas, las cuales disminuyen pasando de 2 a 1 [m] durante el período estival. En cuanto al hemisferio Sur, en las costas del océano Atlántico, las alturas significativas medias están en torno a 1 [m], exceptuando Brasil, en donde las alturas de olas alcanzan los 2 [m]. Con respecto a las costas en el océano Pacífico se destaca el Sur de Chile en donde las alturas de olas alcanzan los 4 [m] disminuyendo hacia el norte llegando a 1.8 [m] en las costas de Perú.

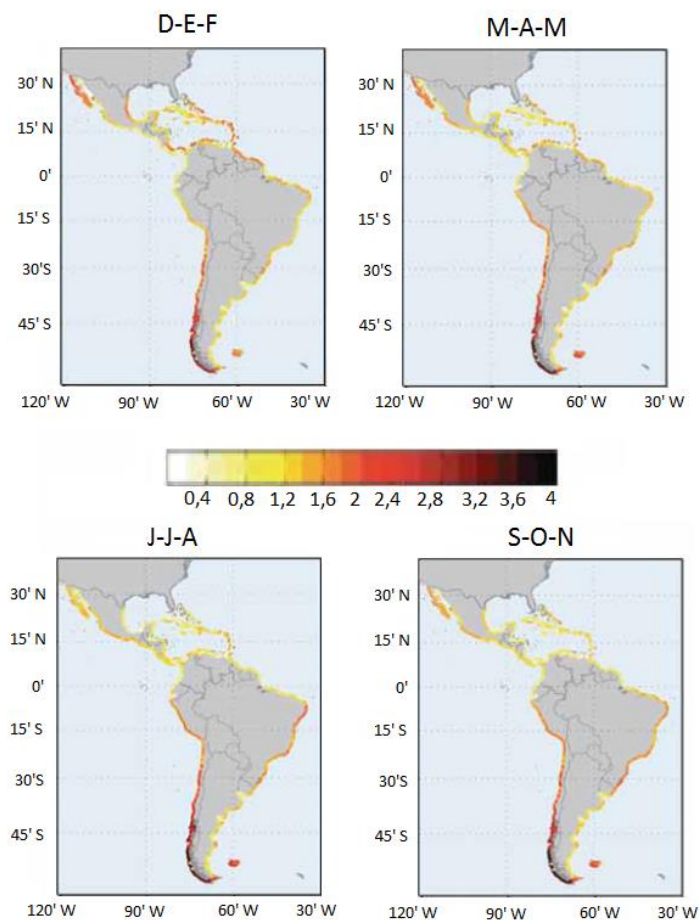


Ilustración 87: Altura significativa media estacional en el período 1992-2009.
Fuente: (CEPAL, 2015).

La Ilustración 88 muestra las condiciones más severas de oleaje que se presentan estacionalmente. Se observa que las máximas alturas de olas en el hemisferio Norte del continente se presentan en el golfo de México alcanzando los 4.5 [m] durante el invierno. Mientras que, en el área Sur del continente, en las costas del océano Atlántico, se destacan Brasil y Uruguay, donde las alturas de olas alcanzan los 3.5 [m]. Con respecto a las costas en el océano Pacífico las alturas significativas máximas estacionales se desarrollan en el

Sur de Chile, en donde alcanzan los 8.5 [m], disminuyendo hacia el norte del país, donde las alturas de olas son de aproximadamente de 5 [m] y en torno a los 3 [m] en las costas de Perú.

En la Ilustración 88 se aprecia claramente la variación estacional que posee el continente, observándose las mayores alturas de olas en los meses de junio, julio y agosto (J-J-A) en el hemisferio Sur y en los meses de diciembre, enero y febrero (D-E-F) en el hemisferio Norte.

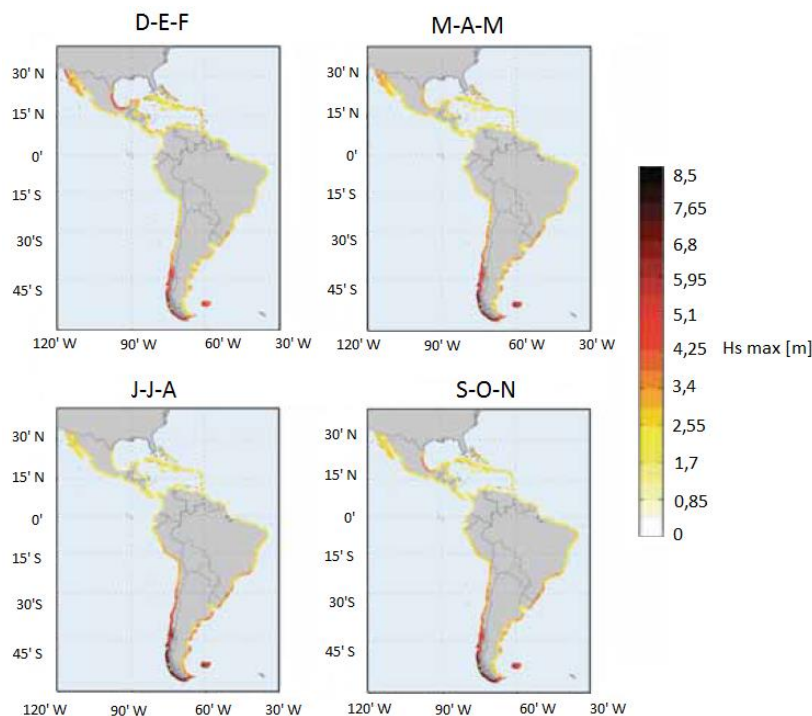


Ilustración 88: Altura significativa máxima estacional correspondiente al período 1992-2009.

Fuente: (CEPAL, 2015).

En la Ilustración 89 se observa que las máximas alturas significativas que superan a la media en 12 horas se desarrollan en Chile, específicamente en Tierra del Fuego. En general, las alturas de olas en el hemisferio Sur, tanto en la costa Atlántica, como Pacífica, están en torno a los 4 y 5 [m]. En el resto del hemisferio Sur se observan valores en torno a los 2 y 2.5 [m], con excepción del golfo de México y la península de California, donde las alturas de olas alcanzan entre los 4 y 5 [m].

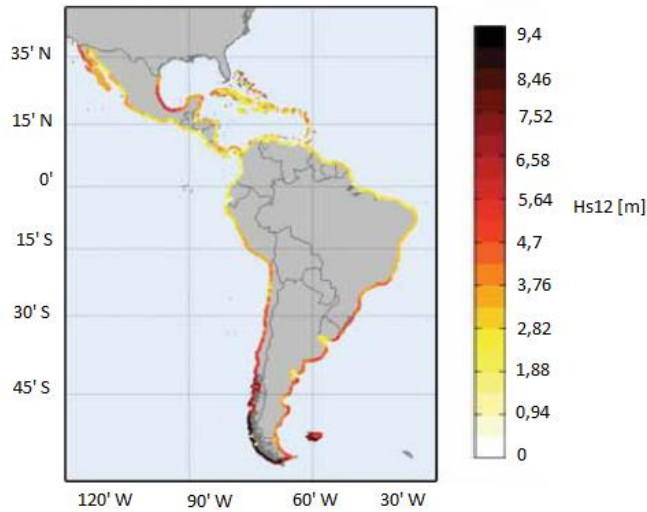


Ilustración 89: Altura significativa superada 12 horas al año en el período 1948-2008.
Fuente: (CEPAL, 2015).

La Ilustración 90 expone la dirección dominante de procedencia de la energía del oleaje. Se observa que en el golfo de México la generación del oleaje posee dirección Norte-Sur y de Este a Oeste en el mar del Caribe. El oleaje en esta zona del continente proviene de las áreas de generación del océano Atlántico. Con respecto al resto del continente, en las costas del Pacífico Sur la dirección media del oleaje es Suroeste. En el Norte de Argentina, Uruguay y Sureste de Brasil la dirección es Sureste y en la costa Norte de Brasil la dirección es Noreste.

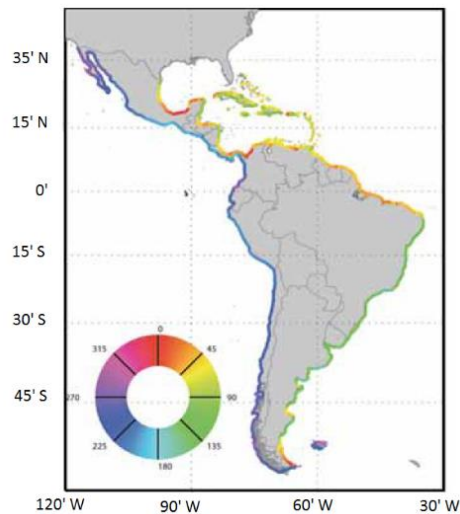


Ilustración 90: Dirección del flujo medio de energía del oleaje en el período 1992-2008.
Fuente: (CEPAL, 2015).

En la Ilustración 91 a) se presentan las variables de oleaje en una red auto-organizativa (SOM), en la cual se puede observar la frecuencia y representatividad de cada estado de mar. El punto desde el cual se obtuvo la información para esta ilustración se presenta en la

figura b). Mientras que la Ilustración 91 c) expone una rosa de oleaje e ilustración d) la distribución estadística de las alturas significativas de olas, tanto medias como máximas mensuales.

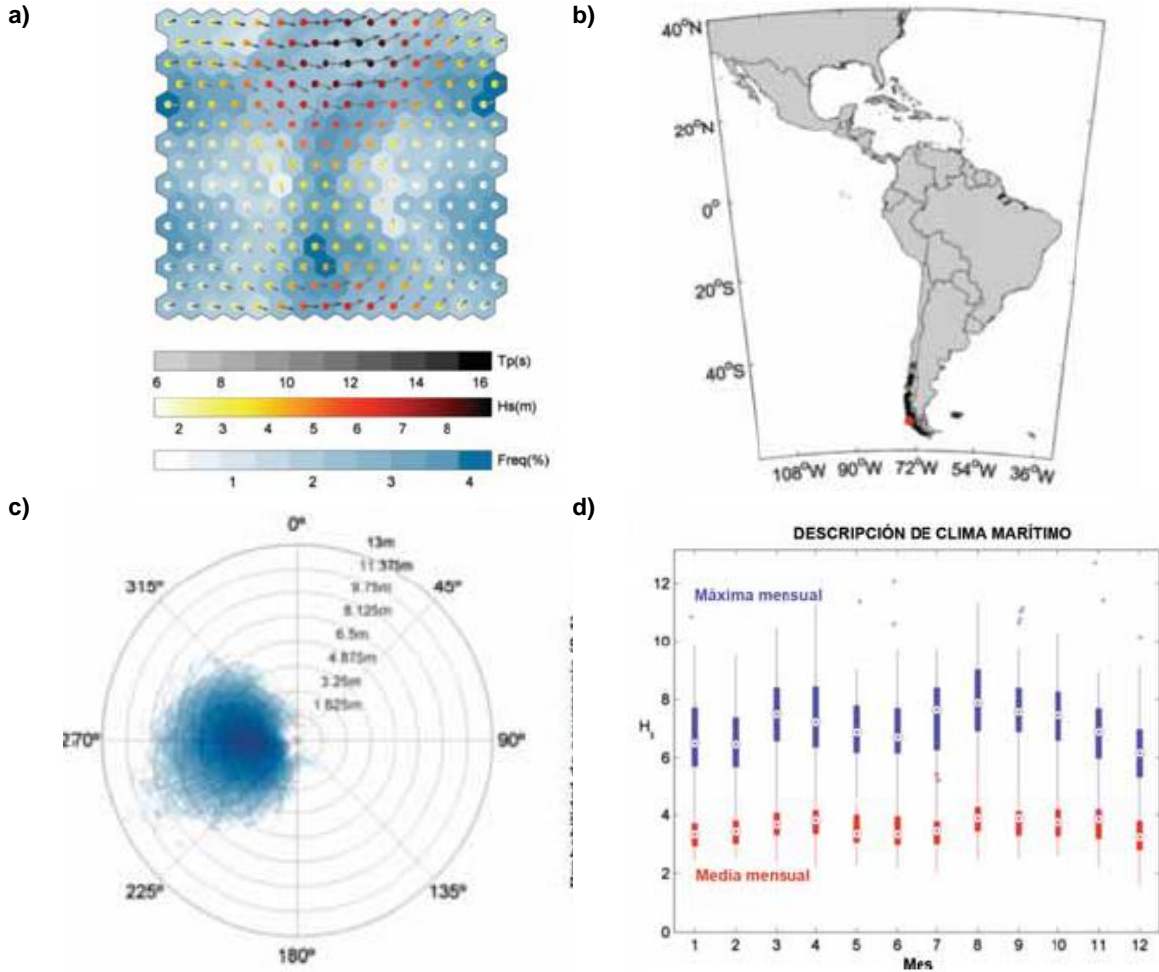


Ilustración 91: Descripción del clima marítimo en Chile en el período 1948-2010. Fuente: (CEPAL, 2015).

11.10.3 MAREA ASTRONÓMICA

En general la marea astronómica en América Latina y el Caribe posee una gran variabilidad espacial. En la Ilustración 92 e Ilustración 93 se hacen visibles estas variaciones. Los datos para la realización de estas ilustraciones fueron obtenidos desde modelos globales de mareas oceánicas los cuales están basados en datos de altimetría de las misiones TOPEX y POSEIDÓN y corresponden al período 1948-2008. Esta base de datos incluye ocho constantes armónicas primarias: componente lunar principal semidiurna (M_2), componente solar principal semidiurna (S_2), componente lunisolar principal semidiurna (K_2), componente lunar elíptica mayor semidiurna (N_2), componente lunisolar declinación diurna (K_1), componente lunar declinación diurna (O_1), componente solar principal diurna (P_1),

componente lunar elíptica mayor diurna (Q_1) y dos constantes armónicas de largo período: la componente lunar quincenal (M_f) y la componente lunar mensual (M_m).

En la Ilustración 93 se puede apreciar que los regímenes macromareales se desarrollan en la parte Sur de Argentina, en donde las carreras de marea alcanzan los 10 [m]. Mientras que los regímenes micromareales se presentan en las islas de Caribe en donde las carreras de mareas son inferiores a los 0.5 [m].

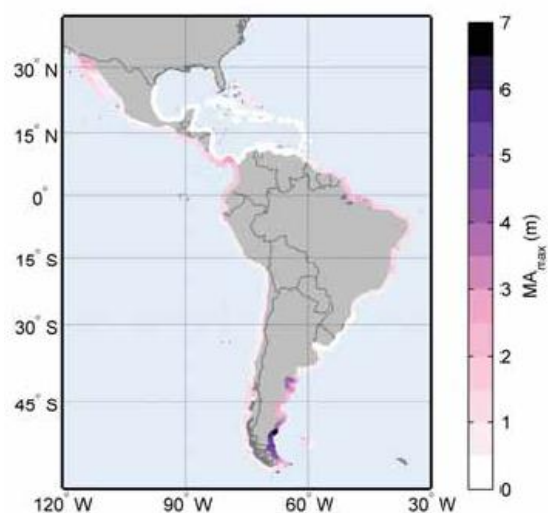


Ilustración 92: Nivel máximo de marea astronómica en el período 1948-2008.
Fuente: (CEPAL, 2015)

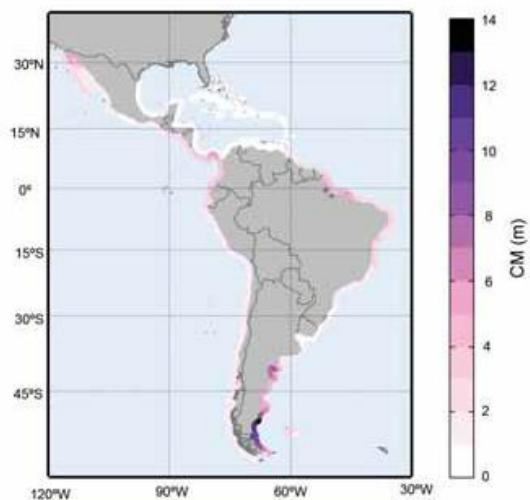


Ilustración 93: Carrera de marea astronómica en el período 1948-2008.
Fuente: (CEPAL, 2015).

11.10.4 MAREA METEOROLÓGICA

Los datos presentados en la Ilustración 94 fueron obtenidos mediante el modelo numérico *Global Ocean Surges* (GOS) del IHCantabria. En la ilustración se observa que la zona del continente con mayores valores de la componente meteorológica se encuentra en las costas de Argentina, Uruguay, y el Sur de Brasil, en donde la marea meteorológica supera el metro.

En la Ilustración 95 se observa que el área que presenta las mayores variaciones de marea meteorológica es la costa de Argentina, específicamente la zona del río de la Plata.

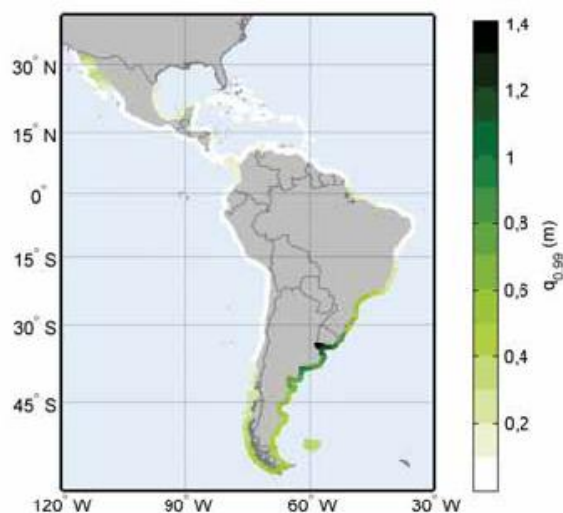


Ilustración 94: Marea meteorológica perteneciente al cuantil medio 0,99 en el período 1948-2008.
Fuente: (CEPAL, 2015)

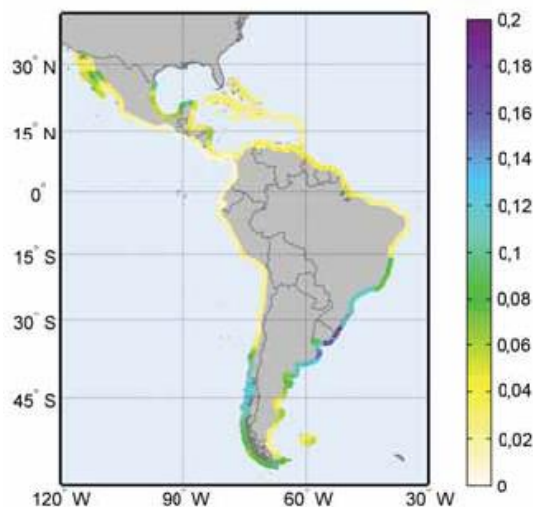


Ilustración 95: Rango de variación mensual del cuantil 0,99 de marea meteorológica desde 1948 a 2008.
Fuente: (CEPAL, 2015).

11.11 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO A NIVEL MUNDIAL

Existen predicciones climáticas a corto y largo plazo. La principal diferencia entre ambas es la prioridad que se le otorga a los cambios en el forzamiento externo y al estado inicial de la variabilidad interna. De esta forma, las predicciones a corto plazo se basan en estimaciones precisas del estado inicial del clima y dan menos prioridad a los forzamientos externos. Mientras que en las proyecciones a largo plazo ocurre lo contrario (Stocker *et al.*, 2013).

Las predicciones a corto plazo dependen de: el calentamiento asegurado, el cual es causado por la inercia de la respuesta de los océanos al forzamiento externo registrado históricamente; la evolución en el tiempo de la variabilidad interna del clima y de las trayectorias del forzamiento externo previstas para el futuro (Stocker *et al.*, 2013).

Durante el desarrollo del capítulo anexos, cuando se haga referencia al período entre el año 2016-2035 se estarán presentando proyecciones a corto plazo. Mientras que cuando se haga referencia al período 2081-2100 las proyecciones corresponden a largo plazo (Stocker *et al.*, 2013).

11.11.1 PROYECCIONES EN LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

Durante el siglo XXI el nivel medio global del mar seguirá aumentando. Es muy probable que en todos los escenarios RCP el ritmo de este aumento será mayor al registrado en el período 1971-2010, debido al aumento de temperatura en los océanos y a la mayor pérdida de masa de los mantos de hielo y glaciares (Stocker *et al.*, 2013).

Es probable que en el período 2081-2100, en relación con el período 1986-2005, el aumento del nivel medio global del mar para el escenario de concentraciones RCP 2.6 sea de 0.26 a 0.55 [m]; de 0.32 a 0.63 [m] para el escenario RCP 4.5; de 0.33 a 0.63 [m] para RCP 6.0 y para el escenario RCP 8.5 de 0.45 a 0.82 [m]. Las estimaciones para RCP 4.5 y RCP 6.0 son muy similares para finales del siglo. Sin embargo, el escenario RCP 4.5 alcanza antes una tasa de elevación superior que el escenario RCP 6.0. En la actualidad no se cuenta con datos suficientes para evaluar la probabilidad de niveles específicos por encima de los rangos probables presentados con anterioridad. Estas estimaciones fueron obtenidas desde los modelos de la CMIP5 junto con modelos basados en el equilibrio de masas de glaciares y mantos de hielo superficiales, con posibles variaciones dinámicas en ellos (Stocker *et al.*, 2013).

La proyección central en la tasa de elevación en el escenario RCP 2.6 es de 4.5 [mm/año] y se mantiene prácticamente constante antes de la mitad del siglo, disminuyendo posteriormente en forma ligera. Para el escenario RCP 4.5 y RCP 6.0 la tasa de elevación hacia finales del siglo es prácticamente constante. En cuanto al escenario RCP 8.5 el aumento del nivel medio del mar continuará durante todo el siglo, la tasa de elevación para este escenario en el período 2081-2100 es de 11 [8 a 16] [mm/año] (Stocker *et al.*, 2013).

El aumento del nivel medio global del mar obedece a las trayectorias de las emisiones de CO₂, no solo al total acumulado. De esta forma, una pronta disminución en las emisiones, manteniendo el total acumulado, significaría una mayor mitigación en la elevación del nivel

del mar. A pesar de esto, es prácticamente seguro que el nivel medio global del mar seguirá aumentando después del año 2100 (Stocker *et al.*, 2013).

Es muy probable que en todos los escenarios RCP la elevación proyectada del nivel medio global del mar para el siglo XXI exceda las elevaciones observadas en el período 1971-2010. La mayor contribución de estas elevaciones es la expansión térmica, responsables de entre el 30 y el 55% del total. La segunda contribución más importante son los glaciares. Los cuales son responsables de entre un 15 a un 35%. Las proyecciones del derretimiento del volumen actual de los glaciares son entre un 15 y un 55% para el escenario RCP 2.6 y entre un 35 a un 85% para RCP 8.5. Las proyecciones indican que en Groenlandia el aumento del derretimiento del hielo superficial superará con creces el aumento por acumulación, por lo que el área de Groenlandia contribuirá de forma positiva a la elevación del nivel del mar durante el siglo XXI. En cuanto al manto de hielo de la Antártica las proyecciones indican un menor derretimiento en superficie y un aumento en la precipitación en forma de nieve, lo que implica una menor contribución al aumento del nivel del mar durante el siglo (Stocker *et al.*, 2013).

Las proyecciones elaboradas en el Quinto Informe de Evaluación son mayores que las realizadas en el Cuarto Informe de Evaluación. Esto se debe principalmente a la inclusión en el Quinto Informe de los cambios rápidos del aflujo de hielo, los cuales aportaran en el período 2081-2100 entre 0.03 a 0.20 [m]. Esta proyección incluye los mantos de hielo de Groenlandia y la Antártica (Stocker *et al.*, 2013).

La Ilustración 96 presenta las proyecciones, realizadas mediante modelos basados en procesos, de la elevación del nivel medio global del mar en relación a los años 1986-2005 para todos los escenarios RCP. Las líneas continuas representan las proyecciones de la mediana. Las líneas discontinuas simbolizan los valores probables para RCP 4.5 y RCP 6.0 y las áreas sombreadas los valores probables para RCP 2.6 y RCP 8.5. Las barras coloreadas presentes al costado derecho de la ilustración representan las medias temporales para el período 2081-2100.

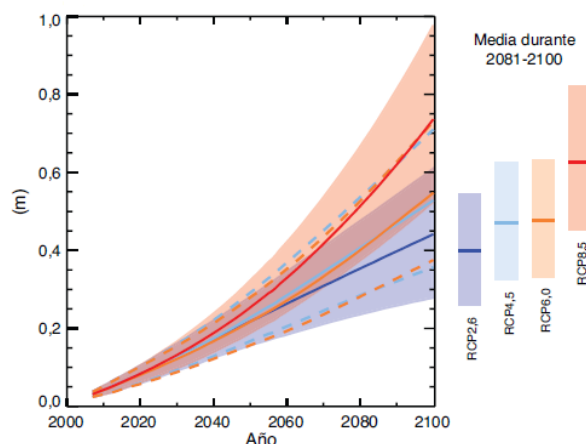


Ilustración 96: Proyecciones de la elevación del nivel medio global del mar.
Fuente: (IPCC, 2013).

Es probable que a finales del siglo XXI muchas regiones presenten desviaciones importantes con respecto a las proyecciones de la variación del nivel medio global del mar, siendo éstas entre un 10 y un 25%, pudiendo alcanzar incluso un 30% de la proyección media global y un 9% de las proyecciones en las zonas oceánicas, lo que refleja que las variaciones espaciales pueden ser importantes en el futuro. Es muy probable que un 95% del océano experimente una elevación del nivel del mar, de forma regional, y que aquellas regiones que observen una disminución del nivel del mar estén cercanas a glaciares actuales o ya desaparecidos, y a mantos de hielo. Las proyecciones para las áreas costeras indican que cerca de un 70% de ellas experimentarían un cambio relativo del nivel del mar (Stocker *et al.*, 2013).

La Ilustración 97 presenta proyecciones obtenidas desde el ensamble evaluado en 21 modelos de la CMIP5 para los escenarios a) RCP 2.6, b) RCP 4.5, c) RCP 6.0 y d) RCP 8.5 entre los períodos 1986-2005 y 2081-2100. Cada uno de los mapas incluye los efectos de la presión atmosférica, hielo continental, GIA y las fuentes de agua continentales.

La Ilustración 98 expone el porcentaje de desviación de las proyecciones del nivel del mar para el escenario RCP 4.5 para el período 2081-2100 en relación al período 1986-2005. La ilustración puede ser considerada, en primera instancia, representativa para los demás escenarios RCP.

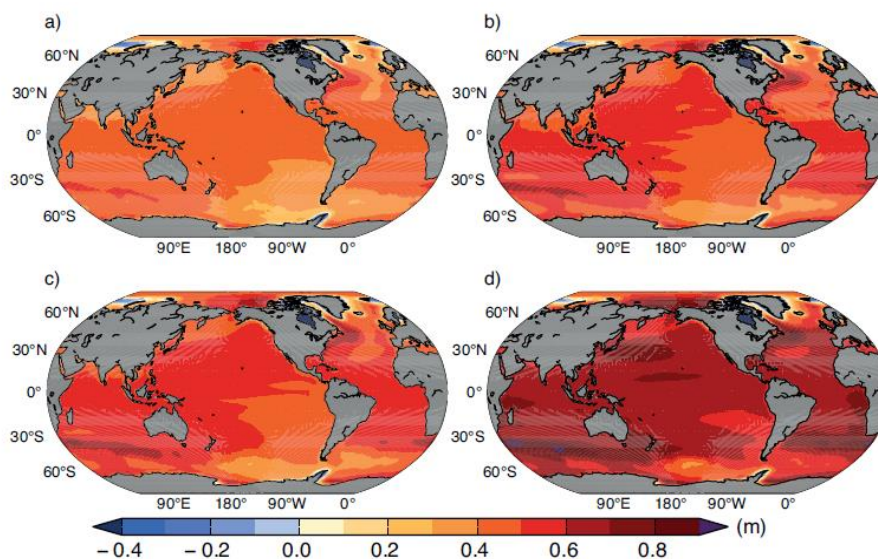


Ilustración 97: Proyecciones del nivel medio relativo neto regional del mar para el período 2081-2100. Fuente: (IPCC, 2013).

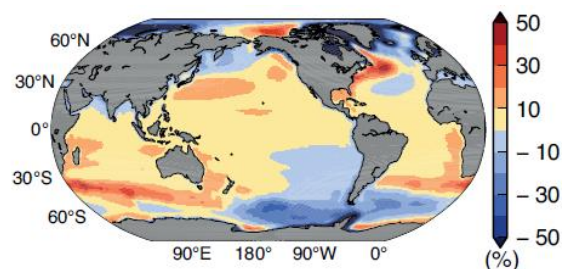


Ilustración 98: Proyección del porcentaje de desviación del nivel del mar regional para el período 2081-2100.

Fuente: (IPCC, 2013)

En la Tabla 59 se presentan proyecciones de temperatura media global del aire en superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para el período 2081-2100. Las anomalías tanto de temperatura como de la elevación del nivel del mar están calculadas con respecto al período 1986-2005 y poseen un intervalo de confianza de entre el 5 y el 95%.

Con los conocimientos actuales aun no es posible realizar una evaluación cuantitativa de la dependencia que existe entre las variaciones del nivel del mar y las contribuciones de los cambios dinámicos rápidos del manto de hielo y del almacenamiento de agua terrestre antropógeno. Por lo que para la realización de las proyecciones mostradas en la Tabla 59, ambos fenómenos son tratados como si se comportaran de acuerdo a una distribución de probabilidades uniforme, y en gran medida con independencia del escenario. El rango probable mostrado en la tabla podría superarse si ocurriese un colapso de áreas marinas del hielo presente en la Antártida durante el siglo XXI. Sin embargo, existe un nivel de confianza medio en que de ocurrir el hecho antes mencionado no representaría una elevación del nivel del mar mayor a algunos centímetros.

Las proyecciones de las temperaturas en el período 2046-2065 poseen un mayor nivel de confianza que las proyecciones para el período 2081-2100. Esto ocurre ya que algunos factores, como la variabilidad interna natural y el forzamiento de gases que no tienen efecto invernadero, no se han cuantificado debido a los insuficientes conocimientos científicos.

Tabla 59: Proyección de las variaciones de temperatura media global del aire en superficie y de la elevación media mundial del nivel del mar para el período 2081-2100.

	Escenario	2046–2065		2081–2100	
		Media	Rango probable	Media	Rango probable
Cambio en la temperatura media global del aire en superficie (en °C)	RCP2,6	1,0	0,4 a 1,6	1,0	0,3 a 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 a 2,0	1,8	1,1 a 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 a 1,8	2,2	1,4 a 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 a 2,6	3,7	2,6 a 4,8
Elevación media mundial del nivel del mar (en metros)	RCP2,6	0,24	0,17 a 0,32	0,40	0,26 a 0,55
	RCP4,5	0,26	0,19 a 0,33	0,47	0,32 a 0,63
	RCP6,0	0,25	0,18 a 0,32	0,48	0,33 a 0,63
	RCP8,5	0,30	0,22 a 0,38	0,63	0,45 a 0,82

Fuente: (IPCC, 2013).

11.11.2 PROYECCIONES DE LA VARIACIÓN DE LOS VALORES EXTREMOS DEL NIVEL DEL MAR Y DE LAS OLAS

Es muy probable que se produzcan aumentos importantes en los valores extremos del nivel del mar en el futuro, además de una disminución, en al menos un orden de magnitud, en los períodos de retorno de dichos valores extremos en algunas regiones del planeta a finales del siglo XXI (Stocker *et al.*, 2013).

En cuanto a las proyecciones en la altura significativa de ola, estas son más inciertas debido al bajo nivel de confianza que existe en las proyecciones sobre tormentas tropicales y extratropicales, y, además el reto que supone la reducción de escalas en los modelos de resolución gruesa para proyectar los estados de viento. En general, es probable que en áreas como el océano Austral aumente la altura significativa de las olas debido al aumento en la intensidad de los vientos y en el océano Ártico aumente el mismo parámetro debido a la reducción de la extensión del hielo marino. Estas proyecciones afectarían a la altura, frecuencia y dirección de las olas en las cuencas adyacentes (Stocker *et al.*, 2013).

11.12 PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE

11.12.1 NIVEL DEL MAR

Como se puede observar en la Ilustración 99 toda la región presentará un aumento del nivel del mar. Los mayores aumentos se obtienen en la costa Atlántica. Mientras que en la costa Norte de Sudamérica se observan valores de aproximadamente 2.8 [mm/año] y, menores valores en la costa del Caribe para el período 2010-2040. En estas mismas zonas la tendencia para el período 2040-2070 es de 3.6 [mm/año].

En la Ilustración 100 a) se presentan el valor medio e Ilustración 100 b) la incertidumbre asociada al nivel del mar para el año horizonte 2040. Mientras que en la Ilustración 101 a) se exponen el valor medio e Ilustración 101 b) la incertidumbre asociada al nivel del mar para el año horizonte 2070. La incertidumbre en ambas ilustraciones posee un intervalo de confianza del 95%.

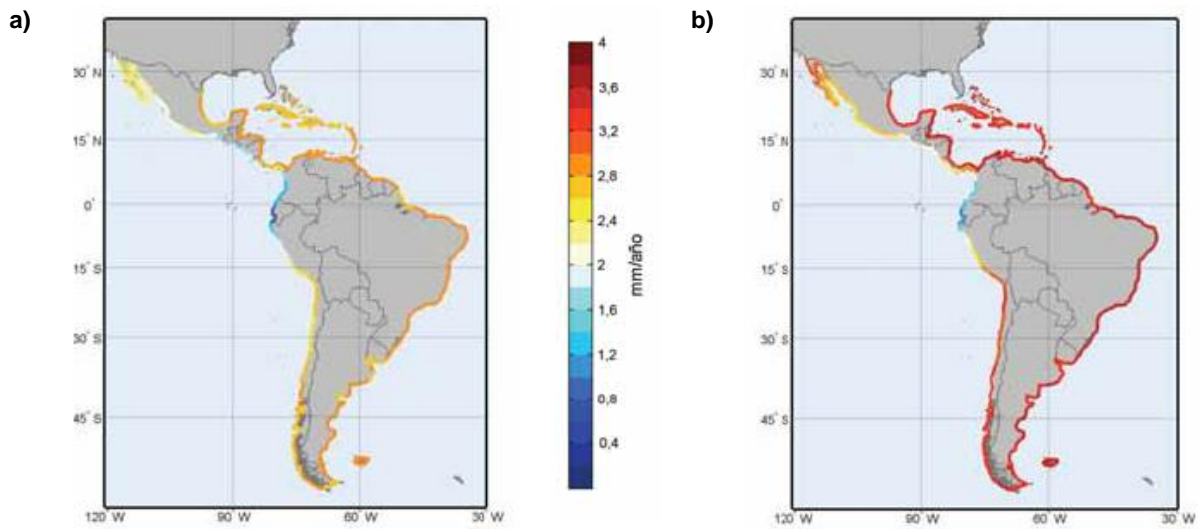


Ilustración 99: a) Proyecciones medias del nivel medio del mar para el período 2010-2040 y b) para el período 2040-2070.
Fuente: (CEPAL, 2015).

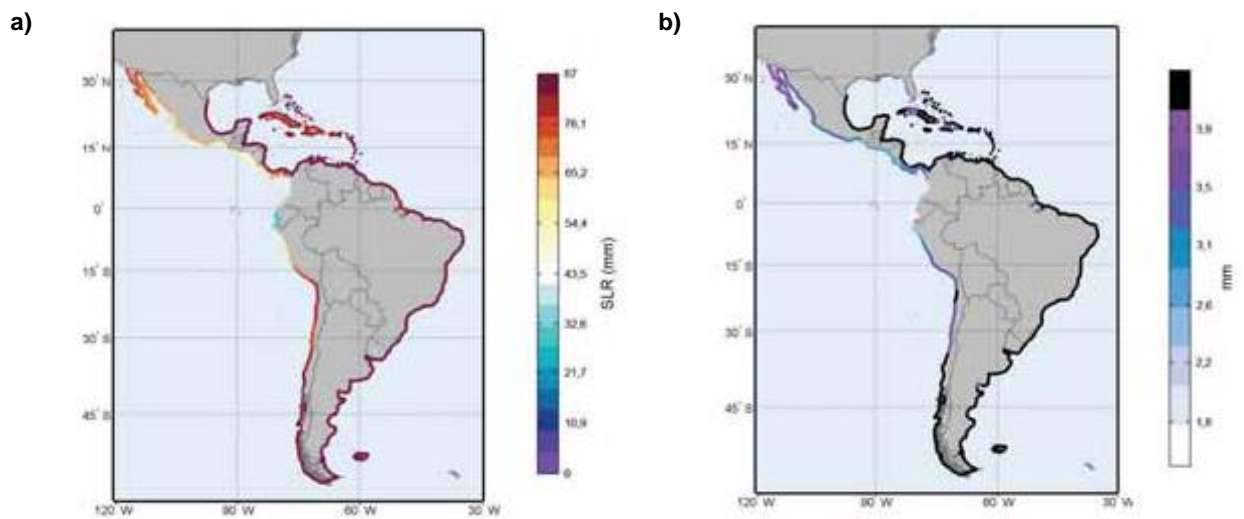


Ilustración 100: a) Valor medio e b) incertidumbre del nivel medio del mar para el año 2040.
Fuente: (CEPAL, 2015).

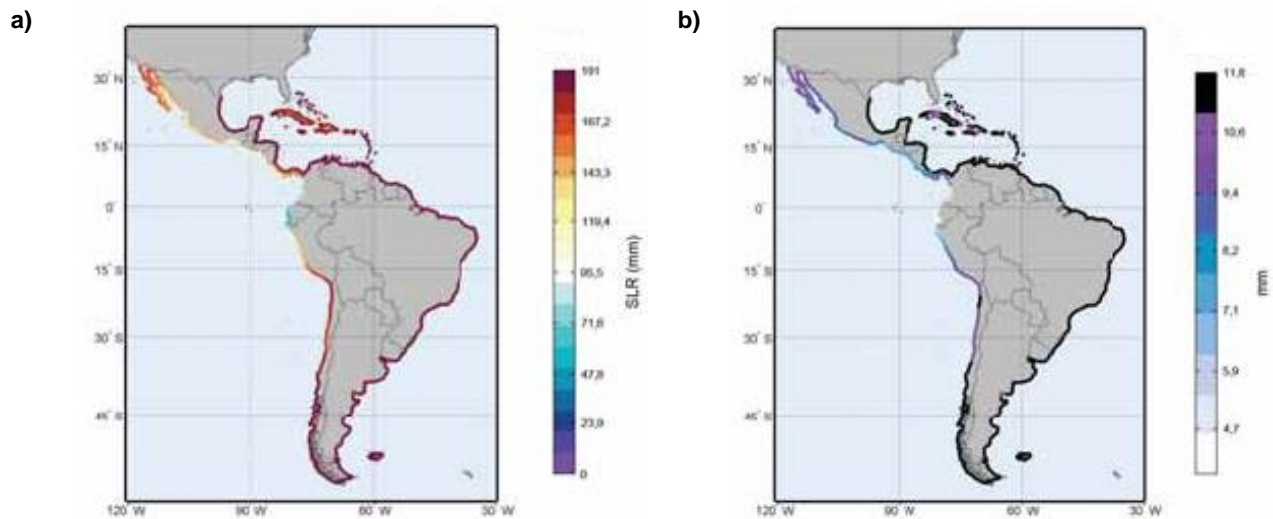


Ilustración 101: a) Valor medio e b) incertidumbre del nivel medio del mar para el año 2070. Fuente: (CEPAL, 2015).

En la Ilustración 102 e Ilustración 104 se presentan las proyecciones del nivel medio del mar relativo para el periodo 2010-2040 y 2040-270, respectivamente. En la Ilustración 103 a) se presentan el valor medio e Ilustración 103 b) la incertidumbre asociada al nivel medio del mar relativo para el año horizonte 2040. Mientras que en la Ilustración 105 a) se exponen el valor medio e Ilustración 105 b) la incertidumbre asociada al nivel del mar para el año horizonte 2070.

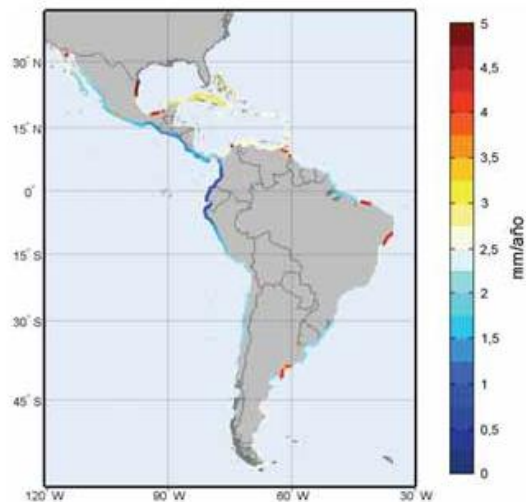


Ilustración 102: Proyección del nivel medio del mar relativo para el período 2010-2040. Fuente: (CEPAL, 2015).

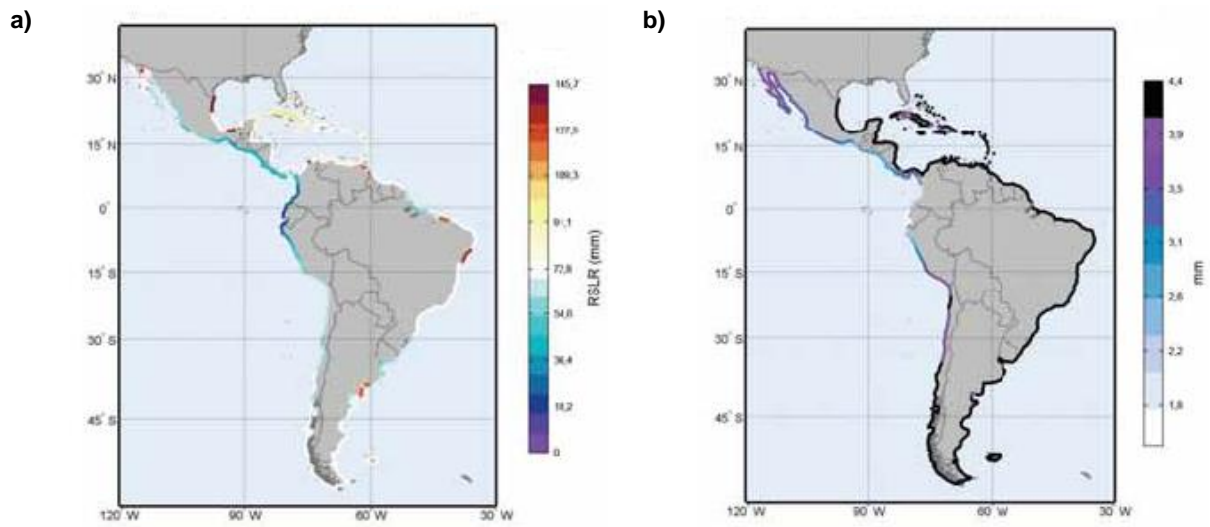


Ilustración 103: a) Valor medio e b) incertidumbre asociada al nivel medio del mar relativo para el año 2040.

Fuente: (CEPAL, 2015).

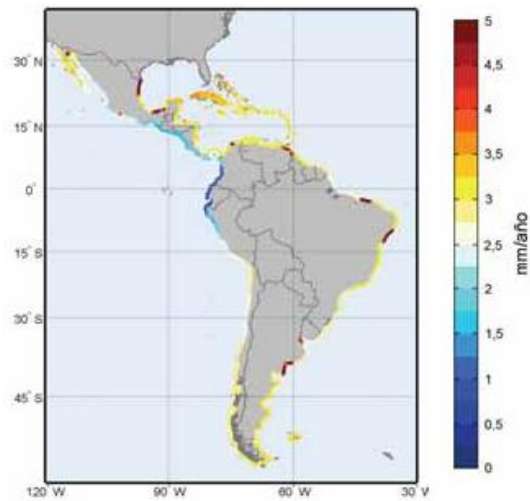


Ilustración 104: Proyecciones del nivel medio del mar relativo para el período 2040-2070.

Fuente: (CEPAL, 2015).

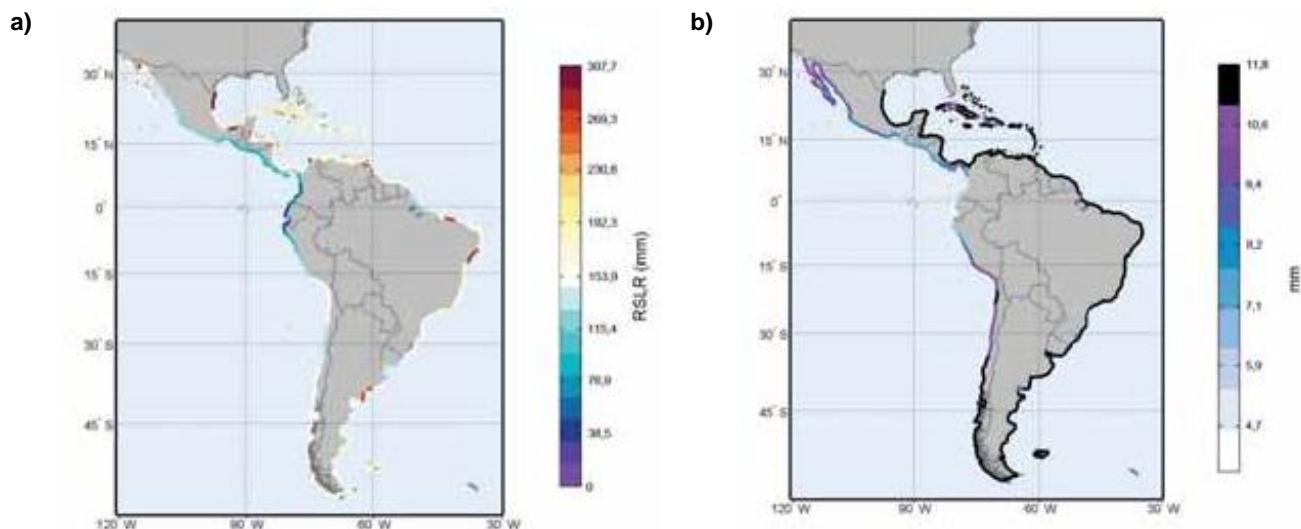


Ilustración 105: a) Valor medio e b) incertidumbre asociada al nivel del mar relativo para el año 2070. Fuente: (CEPAL, 2015).

En conclusión, el aumento del nivel del mar es inequívoco. Las tendencias además muestran que existirá una aceleración de la variación del nivel del mar, ya que se espera que el nivel del mar siga el mismo patrón que ha presentado hasta la fecha. Es decir, un aumento acelerado en las últimas décadas. La tendencia media global actual del ascenso del nivel del mar es de 3.3 [mm/año] con una aceleración media durante el siglo XX de 0.0083 [mm/año] (CEPAL, 2015).

En América Latina y el Caribe el aumento del nivel medio del mar posee una gran variabilidad espacial, presentando los máximos valores (3 [mm/año]) en el Norte de Brasil, Venezuela y en algunas áreas del Caribe y un mínimo (1 [mm/año]) en Ecuador (CEPAL, 2015).

Tomando en cuenta las tendencias actuales y suponiendo una ausencia de sobrecalentamiento global futuro, los valores esperables de aumento del nivel del mar giran en torno a 20 [cm] para el año 2070, rango que está dentro de la variación estacional actual. Si se considera además la subsidencia de la tierra, en algunas áreas de la región, el aumento del nivel del mar girará en torno a 30 [cm] para el año 2070 (CEPAL, 2015).

11.12.2 OLEAJE

Las proyecciones de oleaje que se presentan a continuación fueron ajustadas a tendencias locales lineales (CEPAL, 2015).

Como se puede apreciar en la Ilustración 106 a) se proyecta un aumento generalizado en la región de la altura de ola superada 12 horas al año. Los valores máximos se alcanzan en el Norte de México, Norte de Argentina, Uruguay y Sur de Brasil, zonas con aumentos medios de 3 [cm/año], lo cual supone un aumento de 90 [cm] para el año 2040. La incertidumbre presentada en la Ilustración 106 b) posee un intervalo de confianza del 95%.

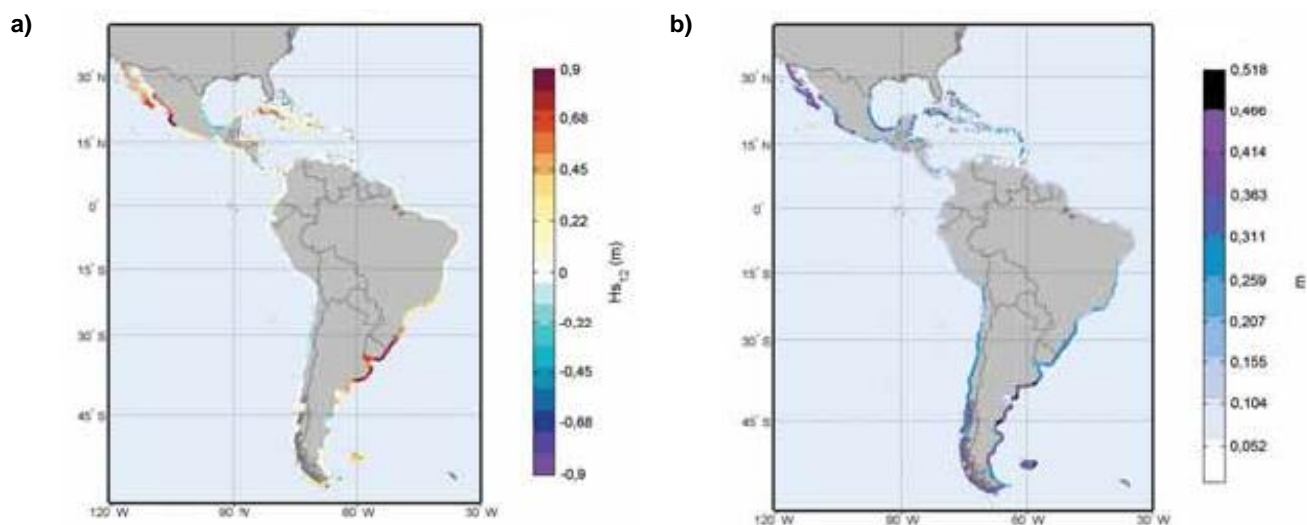


Ilustración 106: a) Variación de la altura significativa superada 12 horas al año (H_{s12}) y b) incertidumbre asociada para el año 2040.
Fuente: (CEPAL, 2015).

En la Ilustración 107 a) se proyecta que para el año 2070 la variación de la altura significativa superada 12 horas al año en algunas áreas del continente como el Norte de México, Norte de Argentina, Uruguay y Sur de Brasil sea de 180 [cm]. La incertidumbre presentada en la Ilustración 107 b) posee un intervalo de confianza del 95%.

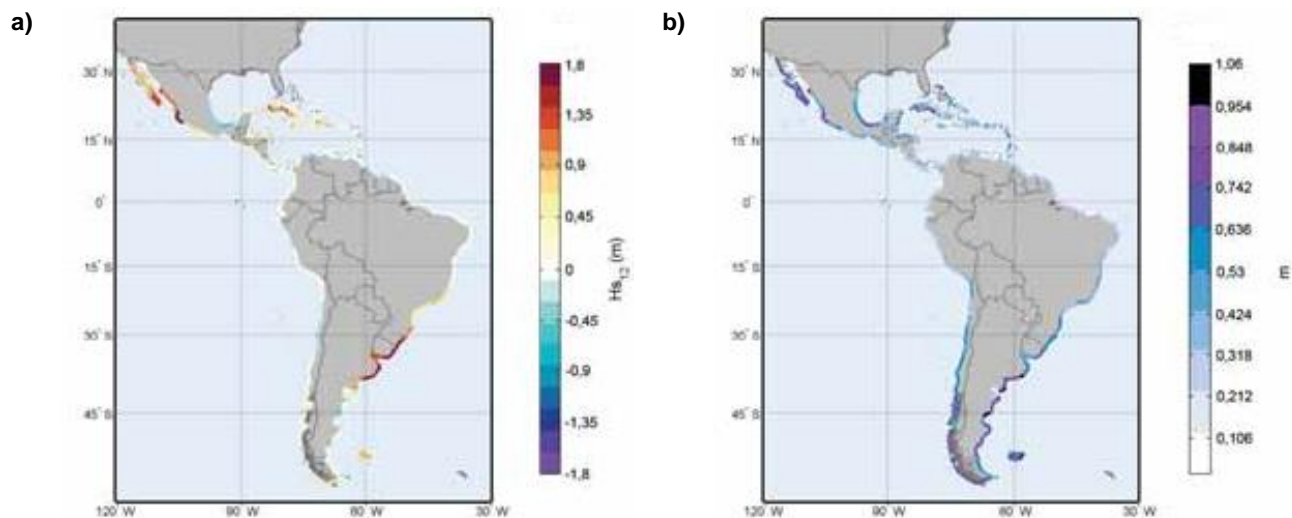


Ilustración 107: a) Variación de H_{s12} y b) incertidumbre asociada b) para el año 2070.
Fuente: (CEPAL, 2015).

En la Ilustración 108 se presenta la probabilidad de superar un aumento de 0.5 [m] la altura significativa superada 12 [h] al año. Se aprecia que los mayores aumentos se producirán en las costas del Río de la Plata y zonas cercanas. También se observarán grandes

aumentos en la costa Pacífica del centro de México, y en menor medida en, Cuba, Jamaica, Haití y República Dominicana.

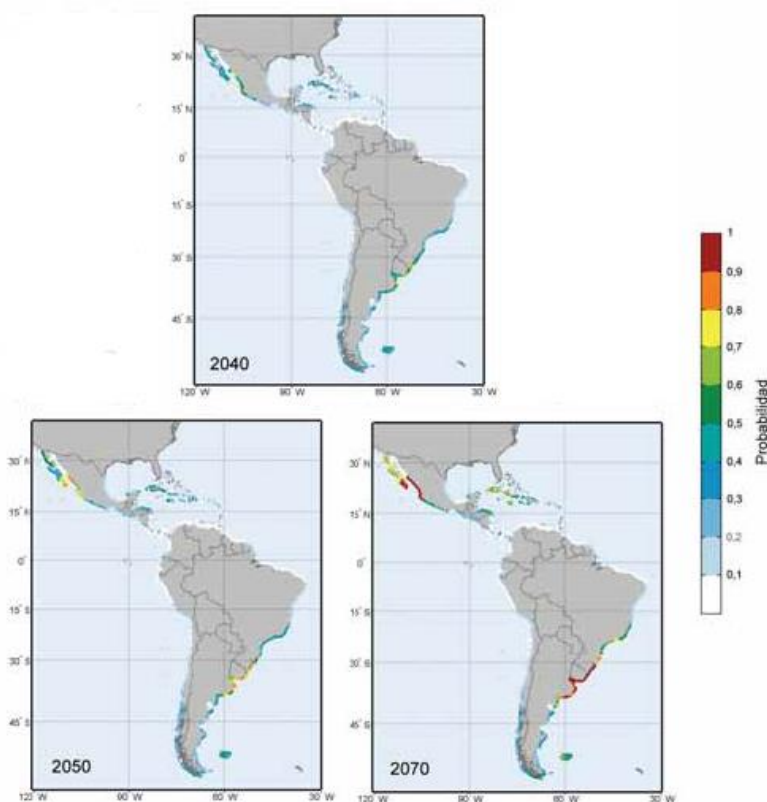


Ilustración 108: Probabilidad de superar un aumento de 0.5 [m] la altura significativa superada 12 horas al año para distintos horizontes de tiempo.
 Fuente: (CEPAL, 2015).

La Tabla 60 presenta la probabilidad de superar en 0.5 [m] la variación de H_{s12} con respecto al valor de la misma variable del año 2010. Se puede observar que la mayor probabilidad se obtiene en el año 2070, en Arica, con un 3% de probabilidad.

Tabla 60: Variación de la probabilidad de superar en 0.5 metros el cambio de H_{s12} respecto al valor de 2010.

Localización	Longitud [°]	Latitud [°]	2040	2050	2070
Concepción	-73.09	-36.83	0.01	0.01	0.02
Valparaíso	-71.63	-32.96	-0.01	-0.01	-0.01
Arica	-70.45	-18.38	0.02	0.02	0.03

Fuente: (CEPAL, 2015).

La Ilustración 109 a) presenta la variación de la altura significativa media mensual. Variable que es un indicador de las condiciones medias (régimen medio) y que tiene incidencia en las actividades que se realizan en los puertos. Se proyecta un aumento generalizado en el continente, con excepción de la costa Sur del Caribe y el golfo de México, donde existen

tendencias negativas de aproximadamente 2 [mm/año]. Los mayores aumentos se presentarán en la costa del océano Pacífico de México, Uruguay, Sur de Brasil, Sur de Chile y en menor medida Sur de Perú. En general, la proyección para el año 2040 es un aumento de 0.3 [m] en la altura significativa media mensual.

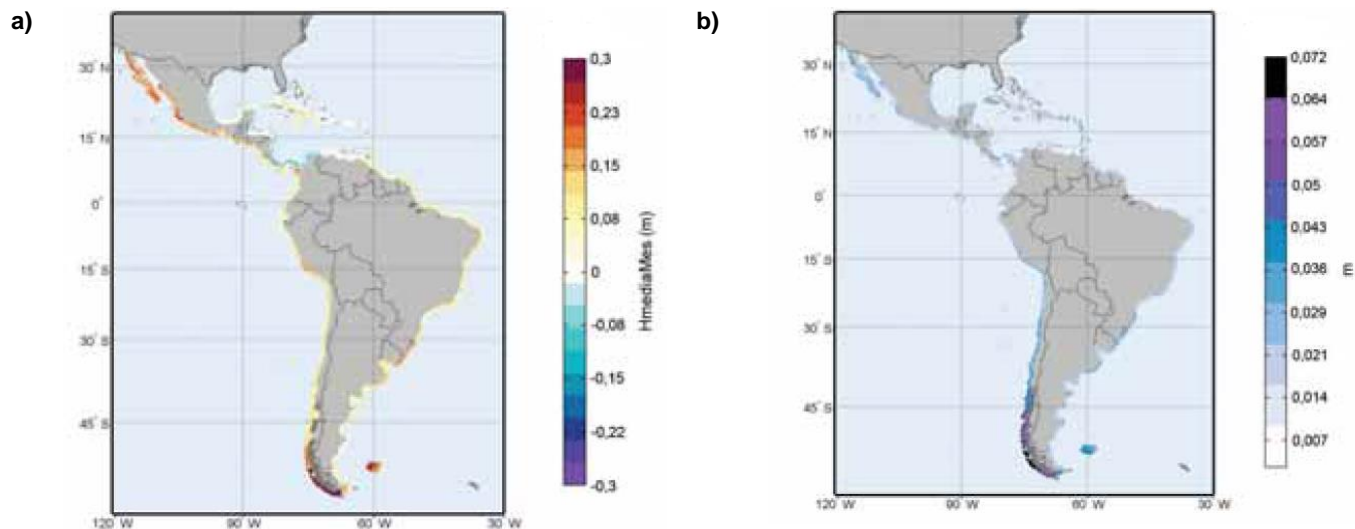


Ilustración 109: a) Variación de la altura significativa media mensual e b) incertidumbre asociada en el año 2040.

Fuente: (CEPAL, 2015).

En la Ilustración 110 a) se presenta la variación de la altura significativa media mensual y en la Ilustración 110 b) la incertidumbre asociada para el año horizonte 2070. Las zonas en las cuales se proyecta el mayor aumento son las mismas que en la Ilustración 109, es decir, la costa Pacífico de México, Uruguay, Sur de Brasil, Sur de Chile y en menor medida Sur de Perú. En general, la proyección para el año 2070 es un aumento de 0.6 [m] en la altura significativa media mensual. Para Chile la tendencia general es al aumento. En el extremo sur el incremento podría llegar a 0.6 [m], mientras que en las costas Norte y Centro-Sur del país las variaciones podrían ser del orden de 0.15 y 0.3 [m].

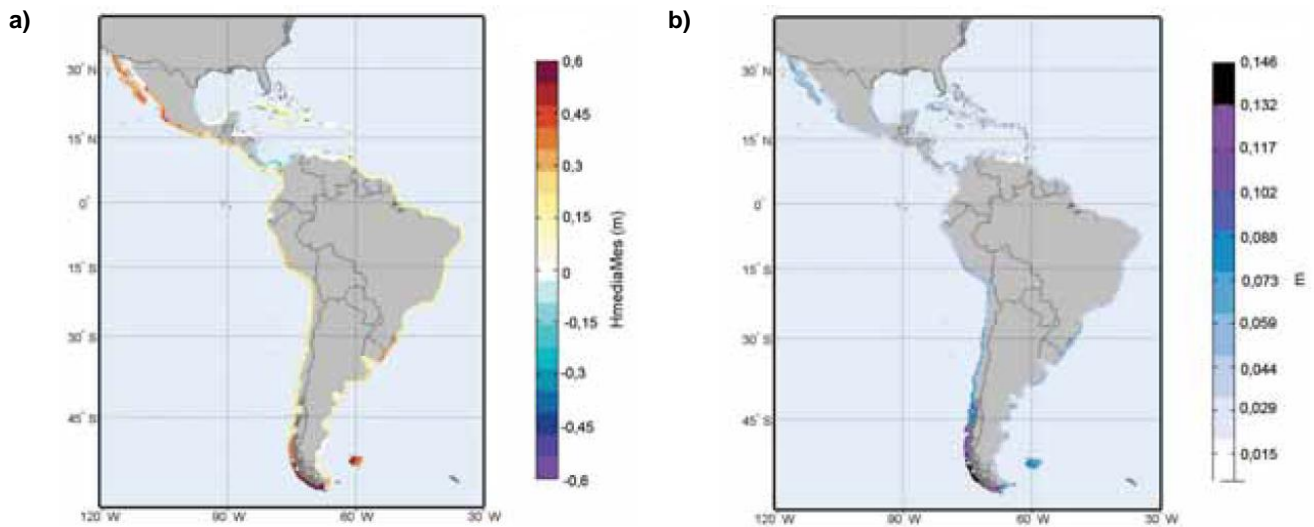


Ilustración 110: a) Variación de la altura significativa media mensual e b) incertidumbre asociada en el año 2070.

Fuente: (CEPAL, 2015).

Si se compara la Ilustración 108 con la Ilustración 111 se puede concluir que la costa del Pacífico de México tiene una probabilidad elevada en ambas ilustraciones. Sin embargo, las otras zonas del continente donde se presenta una alta probabilidad de superar en 0.5 [m] a H_{S12} no se observa una probabilidad alta en la superación de H_S . Un ejemplo de esto es Cuba, zona en la que no se obtiene una probabilidad elevada en la superación de H_S pero sí en la probabilidad de superar H_{S12} . Lo mismo ocurre en Brasil, zona en la cual la probabilidad de superar H_{S12} es mayor que la probabilidad de superar a H_S . Esto a pesar de considerar un menor aumento en H_S (0.2 [m]) que en H_{S12} (0.5 [m]). En el Sur del continente en donde se presentan las mayores alturas de ola de la región, la probabilidad de superar H_S son mayores que las probabilidades de superar H_{S12} .

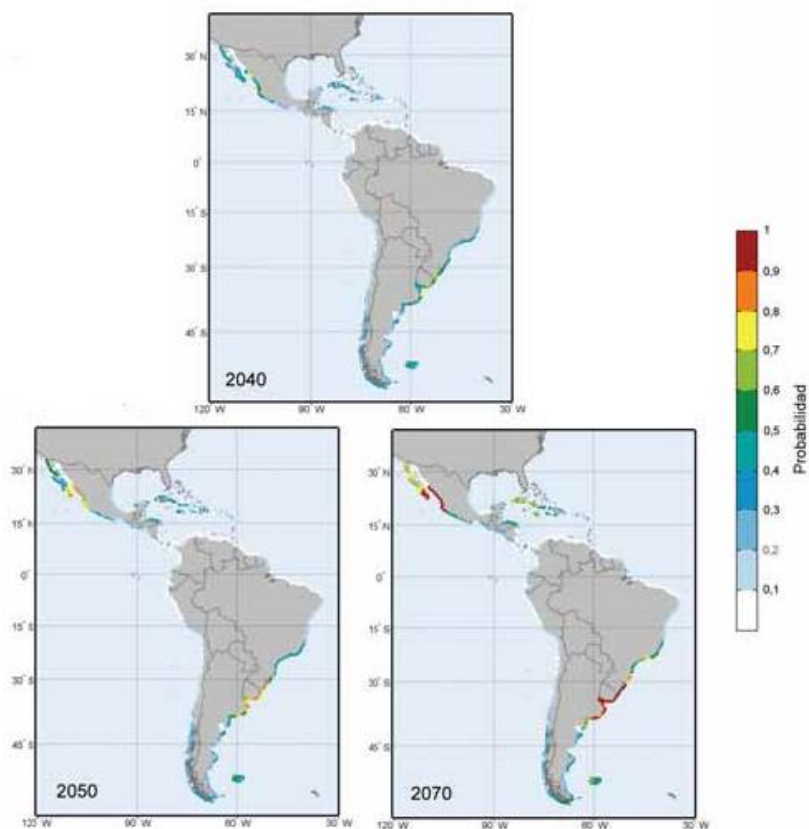


Ilustración 111: Probabilidad de superar un aumento de 0.2 metros de H_s media mensual para diversos horizontes de tiempo.
Fuente: (CEPAL, 2015).

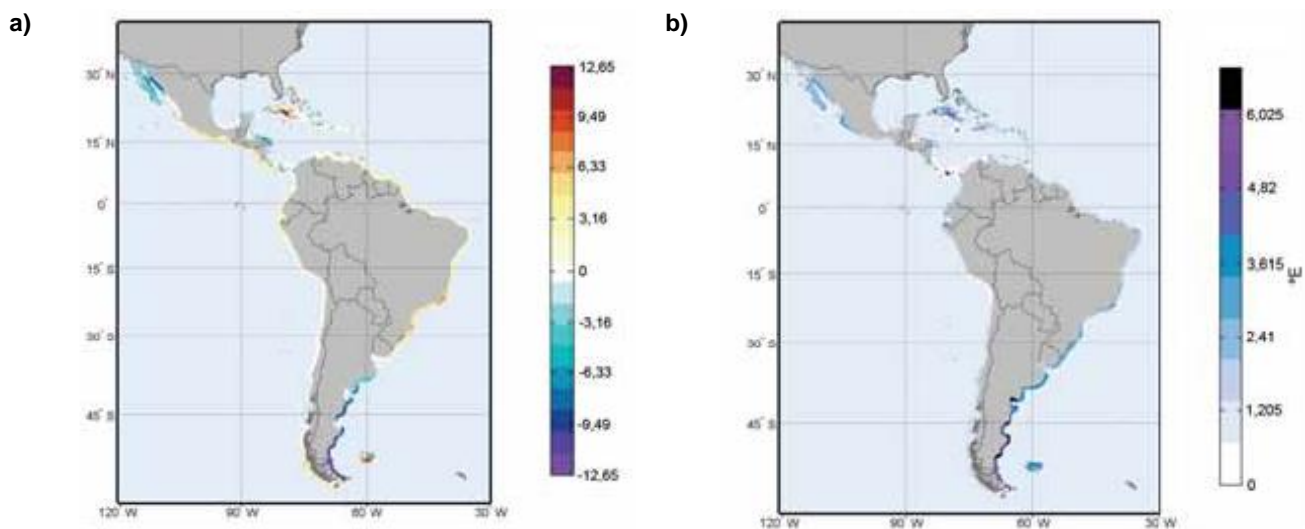


Ilustración 112: a) Variación de la dirección del flujo medio de energía e b) incertidumbre asociada en el año 2040.
Fuente: (CEPAL, 2015).

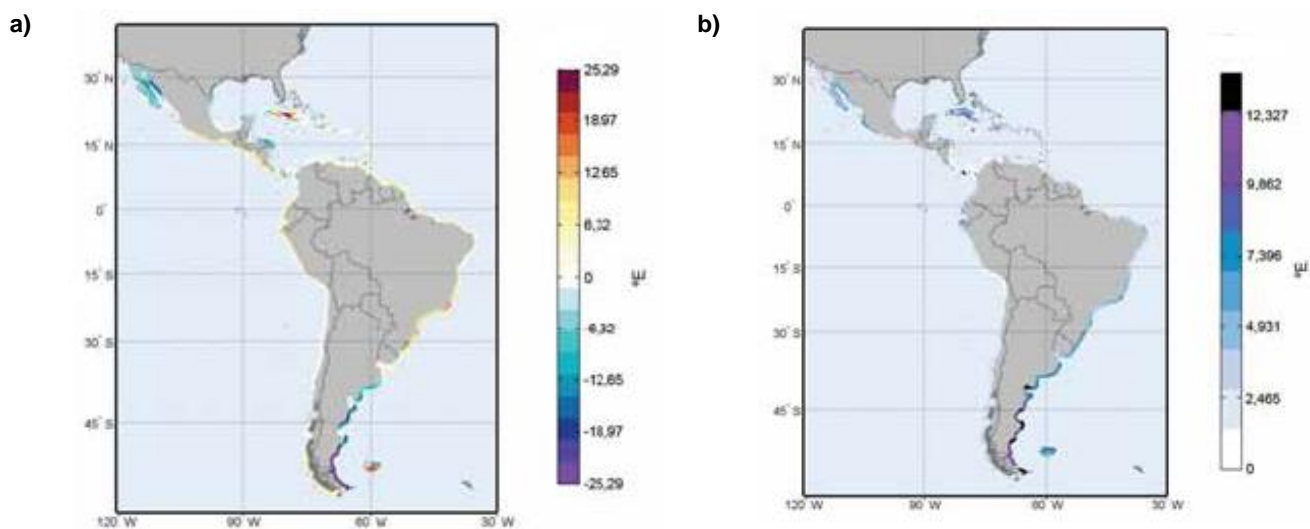


Ilustración 113: a) Variación de la dirección del flujo medio de energía e b) incertidumbre asociada en el año 2070.

Fuente: (CEPAL, 2015)

En general, en la Ilustración 112 e Ilustración 113, se presenta una fuerte tendencia de giro hacia el Norte en la procedencia del oleaje en Argentina. Sin embargo, en el resto de la costa Atlántica las tendencias son positivas. Es decir, tendencias de giro hacia el Sur. Con respecto al mar Caribe este presentará tendencias estables o suaves con giros hacia el Este. En las costas centroamericanas del océano Pacífico la tendencia general de giro es hacia el Norte.

Como resumen de este subcapítulo se puede mencionar que el aumento de H_{S12} se estima en aproximadamente 2.5 [cm/año] en el Sur de Brasil, Uruguay, Norte de Argentina, costa Pacífica de México y Sur de Cuba. Existe una alta probabilidad de que se produzca una variación de más de 0.5 [m] en la H_{S12} para la segunda mitad del siglo. Con respecto a H_S los valores máximos aumentan durante el verano en el hemisferio Sur, en áreas como el Sur de Chile (2.5 [cm/año]) y en invierno en zonas de Uruguay y Sur de Brasil [1.5 cm/año]. Con respecto a la dirección media del oleaje las proyecciones muestran importantes variaciones con giros de hasta 0.2 [°/año] en sentido horario en el Norte de Brasil, Sur de Ecuador, Perú, costa Pacífica Sur de México, Costa Rica, Panamá, Sur de Chile [0.1°/año] y Sur de Brasil (CEPAL, 2015).

11.12.3 EVENTOS EXTREMOS DE OLAJE

Las proyecciones de eventos extremos de oleaje se han realizado mediante un modelado de máximos mensuales con una distribución Generalizada de Extremos (GEV, *Generalized Extreme Value*), mediante un ajuste no estacionario (CEPAL, 2015).

- Oleaje

La Ilustración 114 a) expone la tendencia de largo plazo de los extremos del oleaje durante los meses diciembre, enero y febrero; la Ilustración 114 b) corresponde a los meses marzo,

abril y mayo; la Ilustración 114 c) representa los meses de junio, julio y agosto e Ilustración 114 d) los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Las proyecciones de la tendencia estacional de los extremos de oleaje indican que existirá una disminución de la altura de ola entre los meses de marzo y mayo en la costa Sur del Caribe. En la costa del Atlántico las mayores variaciones de altura de ola se exhiben entre los meses de marzo y agosto con una menor variación el resto del año. En cuanto a la costa Norte del Pacífico, los mayores valores se muestran durante los meses de invierno. En la costa Sur del Pacífico, específicamente el Sur de Chile y Sur de Argentina las mayores alturas de olas se presentan durante los meses de verano (diciembre, enero y febrero).

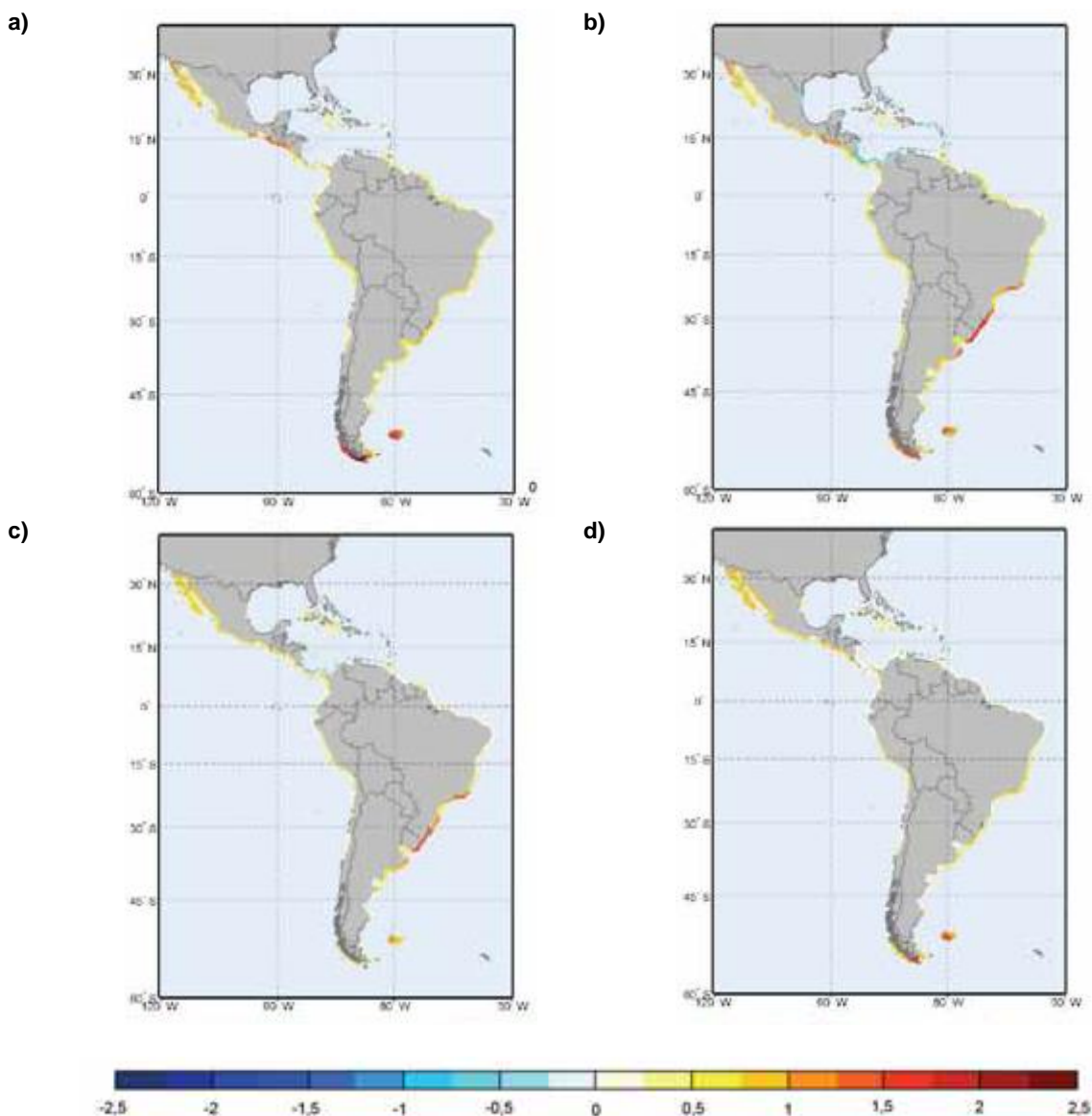


Ilustración 114: Tendencia estacional de los extremos de oleaje a largo plazo.
Fuente: (CEPAL, 2015).

En la Ilustración 115 a) se presenta el valor medio de la altura significativa con periodo de retorno de 50 años para dos años horizontes, 2040 y b) 2070. Se aprecia que las alturas de olas más extremas aumentan hasta en 1 [m] desde el año 2040 al año 2070.

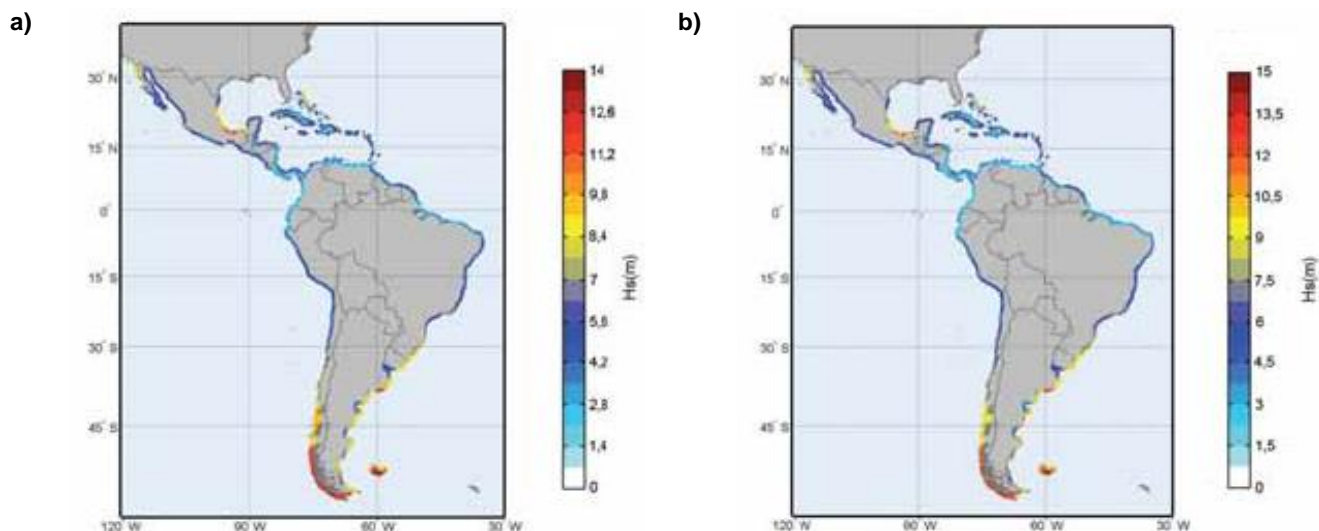


Ilustración 115: a) Valor medio de la altura significativa con período de retorno 50 años para los años 2040 y b) 2070.

Fuente: (CEPAL, 2015).

La Tabla 61 muestra una clara disminución en los períodos de retorno entre los años 2040 y 2070. De este modo alturas de olas que poseían períodos de retorno de 50 años en el año 2010, en el año 2040 esta misma altura de ola tendrá un período de retorno de 41.94 años para la localidad de Concepción, de 41.7 años para Valparaíso y de 34.29 años para Arica, la disminución es aún más marcada para el año 2070.

Tabla 61: Evolución del período de retorno de 50 años de altura de ola significativa para los años 2040 y 2070.

Localización	Longitud [°]	Latitud [°]	2010	2040	2070
Concepción	-73.09	-36.83	50.00	41.94	35.25
Valparaíso	-71.63	-32.96	50.00	41.70	34.73
Arica	-70.45	-18.38	50.00	34.29	23.86

Fuente: (CEPAL, 2015).

11.13 COMPARACIÓN DE LAS PROYECCIONES DEL IPCC ANTERIORES AL QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN CON LAS OBSERVACIONES

Para obtener la credibilidad de la ciencia en lo que respecta al cambio climático la forma más convincente es mediante la comparación entre las observaciones y las proyecciones realizadas por el IPCC.

En la Ilustración 116 (superior izquierda) se exhiben las concentraciones globales medias anuales de CO₂ comparadas con las proyecciones anteriores al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. En color azul oscuro se presentan las concentraciones globales anuales de CO₂ observadas, mientras que los colores rosado claro, verde, celeste y rojo representan la gama proyectada del modelo de las concentraciones globales de CO₂ del Primer Informe de Evaluación de 1990 (1IE), del Segundo Informe de Evaluación de 1996 (2IE), del Tercer Informe de Evaluación 2001 (3IE) y del Cuarto Informe de Evaluación (4IE) de los escenarios A2, A1B Y B1 respectivamente. Las concentraciones están representadas en partes por millón (ppm) y los registros son desde 1950 hasta 2035. En la Ilustración 116 (superior derecha) se presentan las mismas concentraciones de CO₂ observadas, promediadas globalmente graficadas en la primera ilustración izquierda junto con las proyecciones del Quinto informe de Evaluación. Solo se presenta una gama de valores para el escenario RCP 8.5, para el resto de las trayectorias de concentraciones se presenta la mejor estimación.

Los gráficos centrales de la Ilustración 116 representan los cambios estimados de la temperatura media global en superficie observada anualmente referentes al período 1961-1990 desde el año 1950 en comparación con las proyecciones anteriores al Quinto Informe de Evaluación del IPCC. Los cuadrados presentes en el gráfico simbolizan la temperatura media global en superficie observada anualmente, a partir de tres conjuntos de datos. Las líneas continuas reflejan las series cronológicas suavizadas. Las líneas de color gris claro representan los resultados de los modelos utilizados en el Cuarto Informe de Evaluación para el período histórico 1950-2000. Las barras muestran la media de los diferentes ensambles de modelos de la CMIP3. El gráfico central derecho exhibe las proyecciones del promedio anual de la temperatura media global del aire en superficie en el período 1950-2035, relativas al período 1961-1990, junto con las estimaciones observacionales (son las mismas que las graficadas en la ilustración central izquierda). El área sombreada gris ilustra el intervalo probable del promedio anual de la temperatura media global en superficie para el período 2016-2035. La barra gris ubicada fuera del gráfico muestra el intervalo indicativo probable para el año 2035.

El gráfico inferior izquierdo de la Ilustración 116 muestra los cambios estimados en el nivel medio del mar global observado anualmente desde 1950. Los cuadrados simbolizan los valores medios anuales. Las barras ubicadas a la derecha de cada gráfico representan la gama completa estimada para el 2035 respecto a cada Informe de Evaluación. El gráfico inferior derecho presenta la misma estimación de las observaciones que el gráfico inferior izquierdo. Las barras ubicadas al costado derecho del gráfico son las gamas probables, con un nivel de confianza medio, para la elevación del nivel medio global del mar en el año 2035 con respecto al período 1961-1990 según las cuatro trayectorias de concentración representativas.

De los dos gráficos superiores presentes en la Ilustración 116 se concluye que las concentraciones de CO₂ en la atmósfera han aumentado constantemente desde 1950 a 2011. Las proyecciones realizadas en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC presentan la gama de escenarios más estrecha y las concentraciones observadas siguen esta gama. Los resultados del Quinto Informe de Evaluación del IPCC muestran que las concentraciones de CO₂ en la atmósfera aumentaron entre 1.9 a 2.1 [ppm/año].

Con respecto a los dos gráficos centrales de la Ilustración 116 se concluye que la anomalía de la temperatura media global en superficie entre el período 1961-1990 ha sido positiva y mayor a 0.25°C desde aproximadamente 2001. En los gráficos se observa una disminución de temperatura debido a un período de enfriamiento medio global relativo producido por la erupción del monte Pinatubo en 1991. Antes del Cuarto Informe de Evaluación no se incluyeron los efectos de las erupciones volcánicas. Otra anomalía presente en los gráficos centrales se detecta en el período 1995-2000, una parte de esta variabilidad se debió al gran fenómeno El Niño en 1997-1998 y a la fuerte intensidad con que se presentó el fenómeno de La Niña entre los años 1999-2001.

En relación al nivel medio global del mar los datos obtenidos desde mareógrafos y altimetría por satélite durante el período 1961-1990 muestran que ha seguido aumentando. Las estimaciones observadas se sitúan en la envolvente de todas las proyecciones con excepción de los primeros años de la década de 1990. Durante los años 1901 y 2010 la tasa media de elevación fue de 1.7 [mm/año], con un rango muy probable de entre 1.5 y 1.9 [mm/año]. Esta tasa aumento para el período 1993-2010 a 3.2 [mm/año] con un rango muy probable de 2.8 a 3.6 [mm/año].

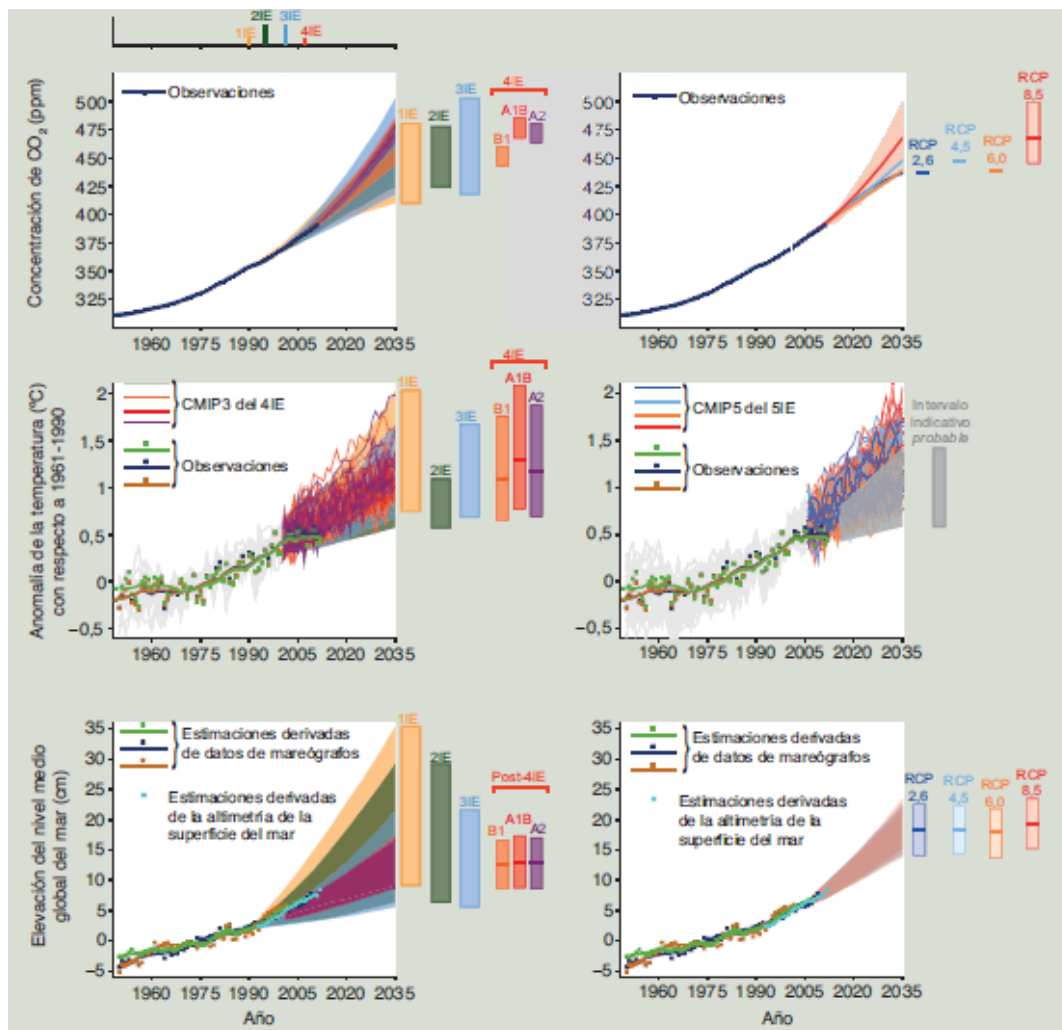


Ilustración 116: Comparación de las proyecciones del IPCC con las observaciones de: concentraciones medias anuales de CO₂ (ilustraciones superiores), temperatura media global anual en superficie (ilustraciones centrales) y nivel medio global del mar (ilustraciones inferiores).
 Fuente: (IPCC, 2013).

11.14 ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

11.14.1 ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL MUNDO

La CMUNCC ha logrado grandes avances durante la última década en el ámbito de adaptación, algunos de estos avances son (Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, 2014):

- En la CP7 realizada en Marrakech, Marruecos, en el 2001 se estableció un programa de trabajo para el desarrollo de capacidades nacionales, en relación al cambio climático, donde se incluyeron Programas Nacionales de Acciones de Adaptación.

- En la CP12 realizada en Nairobi, Kenia, durante el 2006 la CMNUCC encargó a su Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico la creación de un proyecto para abordar temáticas de vulnerabilidad y adaptación al cambio climático.
- En 2007 la CMUNCC puso en funcionamiento el Fondo de Adaptación, con la finalidad de financiar proyectos y programas de adaptación al cambio climático.
- En la CP16 realizada en Cancún, México, en el año 2010 se estableció el *Cancún Adaptation Framework* (CAF). En el cual se establecen las medidas de adaptación y su implementación a nivel nacional.
- En 2011 durante la CP17 realizada en Durban, Sudáfrica, se definieron las “Directrices iniciales para la formulación de planes nacionales de adaptación para países menos desarrollados”.

El estado de California destaca a nivel mundial por sus planes de adaptación al cambio climático. En 2008 la Agencia de Recursos Naturales de California identificó cómo las distintas agencias estatales podían hacer frente a los desafíos que presentará el cambio climático en el futuro. De esta manera, la Estrategia para la Adaptación Climática de California contiene acciones específicas en siete áreas (salud pública, biodiversidad y hábitat, océano y recursos costeros, gestión de recursos acuíferos, agricultura, forestal, transporte e infraestructura eléctrica). Además de recomendaciones para manejar los desafíos en ciernes (Centro de Cambio Global y Centro de Políticas Públicas de la Universidad Católica de Chile, 2010). Otra ciudad que destaca por sus planes de adaptación es Londres, donde el Gobierno británico ha elaborado amplios planes de adaptación para mejorar las defensas contra inundaciones, con la finalidad de proteger a la ciudad contra las futuras mareas meteorológicas e inundaciones fluviales. Dichos planes de adaptación también incorporan un análisis de las distintas trayectorias para las diferentes opciones y decisiones de adaptación dependientes de la elevación del nivel del mar, con una observación permanente de los factores impulsores (Field *et al.*, 2014).

11.14.2 ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE

Chile cumple con siete de los nueve criterios considerados por la CMNUCC para catalogar a los países como especialmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático, estos son (Naciones Unidas, 1992):

- Países con zonas costeras bajas.
- Países con zonas áridas y semiáridas
- Países con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal.
- Países con zonas propensas a desastres naturales.
- Países con zonas expuestas a la sequía y a la desertificación.
- Países con zonas de alta contaminación atmosférica urbana.
- Países con zonas de ecosistemas frágiles, incluidos los ecosistemas montañosos.

La adaptación para países vulnerables al cambio climático, como lo es Chile, debe considerar la adaptación como un pilar fundamental para el desarrollo futuro del país

(Gobierno de Chile, 2011). En este contexto de adaptación, Chile ha realizado numerosos avances. Por ejemplo, en el año 2006 el Comité Nacional Asesor sobre Cambio Global publicó la Estrategia Nacional de Cambio Climático, que luego de dos años se hizo operativa mediante el “Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2008-2012” (en adelante PANCC) de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) y durante los años 2015-2016 el Gobierno de Chile preparó el PANCC 2017-2022. Los PANCCs incluyen tres ejes de acción uno de ellos dedicado a la adaptación a los impactos del cambio climático. A partir de este Plan Nacional surgen diversos estudios coordinados por el Ministerio de Medio Ambiente, tales como, Planes Sectoriales de Adaptación y un Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. En la actualidad se encuentran disponibles tres planes sectoriales de las áreas silvoagropecuaria (2013), biodiversidad (2014) y el de pesca y acuicultura (2015). El plan de adaptación del sector de salud se encuentra ad portas de su aprobación. Los planes de adaptación de los sectores de infraestructura (2017), ciudades (2017), recursos hídricos (2018), energía (2018) y turismo (2018) se encuentran en diferentes etapas de desarrollo (Gobierno de Chile, 2016).

Otro de los avances que ha llevado a cabo Chile ha sido la creación de la Oficina de Cambio Climático, en el año 2010, la cual tiene una Autoridad Designada para Chile en el Fondo de Adaptación creado por la CMUNCC. En el año 2012 se creó un Comité Asesor de la Autoridad Designada del Fondo de Adaptación, el cual tiene entre sus funciones seleccionar los proyectos más apropiados para Chile referentes a medidas concretas de adaptación al cambio climático. Junto con esto Chile ha realizado tres Comunicaciones Nacionales ante la CMNUCC, la primera en el año 2000, la segunda en 2011 y la tercera en 2016 (PNUD, 2016).

Como se mencionó en el párrafo anterior se han desarrollado diversas acciones con respecto a la adaptación para enfrentar el cambio climático. Sin embargo, en la actualidad, ninguna de estas acciones incluye protocolos claros y explícitos en el proceso de definición, planificación, evaluación, diseño y seguimiento, de infraestructura del MOP, que considere los efectos que podría tener el cambio climático y las medidas de adaptación necesarias para dichos efectos (Vicuña *et al.*, 2013).

