



Facultad de Ingeniería

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE
ALTERNATIVAS DE MEJORAMIENTO DE LAS
CONDICIONES PARA LA PRÁCTICA DE SURF Y EL
CONTROL DE LA EROSIÓN EN EL SECTOR SUR DE LA
PLAYA REÑACA**

FRANCISCO ANTONIO NAVARRO SALAZAR

ENERO 2016

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS DE
MEJORAMIENTO DE LAS CONDICIONES PARA LA PRÁCTICA DE SURF Y EL CONTROL DE LA
EROSIÓN EN EL SECTOR SUR DE LA PLAYA REÑACA**

Francisco Navarro Salazar

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Jose Beyá M.
Profesor guía

Matías Alday G.
Docente

José Luis Contreras G.
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.

José Beyá Marshall
Profesor Guía

Francisco Navarro Salazar
Alumno Memorista

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera expresar mis agradecimientos al profesor José Beya Marshall, quien me guio en este proceso e incluso me acompañó a realizar las mediciones en el agua, lo que fue una experiencia agotadora y entretenida. Agradecido de su paciencia y de no dejarme a pesar de todo el tiempo en que se extendió este proyecto.

Al profesor Patricio Catalán por confiar en mí y facilitarme sus equipos para realizar el sondaje monohaz.

A mi querido amigo y compañero de estudio a lo largo de la carrera José Ribba quien me facilitó los kayaks.

A mi querida amiga Gina Gajardo por acompañarme y hacerme reír cuando nos juntábamos a “avanzar”.

A Paulina Capó por acompañarme a realizar mediciones en la playa y transformar una actividad un poco tediosa en algo entretenido.

A mi familia, hermanita linda y primos por darme apoyo y molestarme para que termine de una vez la tesis.

A todos los que me facilitaron información y me ayudaron de una u otra forma y sus nombres en este momento olvido.

Finalmente a mis padres Verónica y Sergio, a quien un simple agradecimiento no basta para expresar todo, la paciencia que me tuvieron, la confianza y el apoyo durante toda la carrera. Gracias por todo el amor y enseñanzas que me han entregado durante toda mi vida, son un maravilloso ejemplo para mí. Esto es para ustedes, me demoré, pero igual lo hice!!! Los amo.

... y pensaban que no me iba a titular nunca! Ja!

Por fin se cierra un ciclo... se viene uno mejor aún!

Francisco Navarro Salazar
Kiko

CONTENIDOS

1	RESUMEN	14
2	INTRODUCCIÓN	15
3	OBJETIVOS	20
3.1	GENERAL	20
3.2	ESPECÍFICOS.....	20
4	MARCO TEÓRICO	21
4.1	OLEAJE	21
4.2	TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE LLEGANDO A LA COSTA.....	28
4.2.1	<i>Shoaling</i>	28
4.2.2	<i>Refracción</i>	29
4.2.3	<i>Difracción</i>	31
4.2.4	<i>Reflexión</i>	32
4.3	METODOLOGÍA DE PROPAGACIÓN: MODELO SWAN	32
4.4	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	33
4.4.1	<i>Transporte Longitudinal</i>	34
4.4.2	<i>Transporte Transversal</i>	37
4.4.3	<i>Indicadores Estadísticos</i>	39
4.5	EL DEPORTE DEL SURF	42
4.5.1	<i>Medidas de Surfeabilidad</i>	42
4.6	OBRA DE ABRIGO SUMERGIDA: DIQUE ARRECIFE	47
4.6.1	<i>ASR en el mundo</i>	49
4.6.2	<i>Geometría más apropiada para un dique arrecife multifuncional</i>	55
4.6.3	<i>Metodología de diseño de arrecifes artificiales para condicionar la rotura del olaje</i>	59
4.7	RESPUESTA DE LINEA DE COSTA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE UN DIQUE SUMERGIDO	61
5	DESCRIPCIÓN DEL MEDIO	64
5.1	BATIMETRÍA	64
5.2	MAREA.....	71
5.3	CLIMA DE OLAJE	72
5.3.1	<i>Análisis de Clima Medio</i>	72
5.3.2	<i>Análisis de Clima Extremo</i>	79
5.4	ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO.....	81
5.5	ESTUDIO GRANULOMÉTRICO 1981	83
5.6	ESTUDIO GRANULOMÉTRICO 2012.....	85
5.6.1	<i>Análisis Estadístico</i>	91
5.7	COMPARACIÓN DE ESTUDIOS 1981 V/S 2012.....	92
5.8	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	95
5.8.1	<i>Estudio de transporte longitudinal mediante formulación del CERC</i>	97
5.8.2	<i>Obtención de la altura en rotura por método del CERC y con K de Bailard</i>	100
5.8.3	<i>Distribución transversal del transporte longitudinal</i>	102
6	MODELACIÓN	106
6.1	CASOS SELECCIONADOS	106

6.1.1	<i>Transferencia</i>	108
7	REQUISITOS DE DISEÑO DEL ARRECIFE ARTIFICIAL	116
7.1	DISEÑO DE PERFIL Y PENDIENTE ESTÁNDAR	116
7.2	PROFUNDIDAD DE ROMPIENTE V/S ANÁLISIS DE ALTURA DE OLA EN ROMPIENTE	118
7.3	DISEÑO EN PLANTA Y CORTE	119
7.4	MODELACIÓN.....	121
7.5	MODIFICACIONES DE DISEÑO	127
7.5.1	<i>Modelación</i>	127
7.5.2	<i>Ángulo de Descrestamiento</i>	132
7.5.3	<i>Diseño Final</i>	133
7.6	ANÁLISIS DE OPERACIÓN.....	148
7.7	CÁLCULO DE SALIENTE.....	150
7.7.1	<i>Predicción del Volumen de la Saliente</i>	152
7.8	MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES.....	155
8	COSTOS	159
8.1	ALIMENTACIÓN DE SALIENTE Y RELLENO DE DIQUE	159
9	CONCLUSIONES	164
10	REFERENCIAS	167
11	ANEXO	171
11.1	RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.....	171
11.2	RESULTADOS MODELACIÓN.....	177
11.2.1	<i>Modelación Marea Baja</i>	181
11.2.2	<i>Modelación Marea Alta</i>	187
11.2.3	<i>Modelación Clima Extremo</i>	193

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Relación clase de surfista, ángulo de descrestamiento y altura de ola.	43
Tabla 2: Velocidad de remo del surfista [m/s].....	46
Tabla 3: Comparación de características de ASRs en el mundo.....	55
Tabla 4: Relaciones y condiciones de la creación de saliente o tómbolos	63
Tabla 5: Pronóstico WindGuru día de campaña.....	66
Tabla 6: Tabla Incidencia Altura v/s Periodo.....	74
Tabla 7: Tabla Incidencia Altura v/s Dirección.....	75
Tabla 8: Tabla de Incidencia Periodo v/s Dirección.....	76
Tabla 9: Coordenadas de las muestras.....	87
Tabla 10: Clasificación de Granos	87
Tabla 11: Perfil 1, Porcentaje Retenido	87
Tabla 12: Porcentaje Pasante de sedimentos.....	88
Tabla 13: Diámetros Relevantes y Velocidad de Sedimentación.....	90
Tabla 14: Indicadores Estadísticos	91
Tabla 15 : Porcentaje pasante de Zona sumergida.....	96
Tabla 16: Parámetros constantes	97
Tabla 17: QI+ y QI-.....	97
Tabla 18: Q bruto y Q neto	98
Tabla 19: Transportes Longitudinales, los valores de la tabla presentan QI [m ³ /s]	99
Tabla 20: QI+ y QI- con K de Bailard.....	101
Tabla 21: Qn y Qb con K de Bailard.....	101
Tabla 22: Resultados de Qn y Qb mediante CERC y Queens.....	104
Tabla 23: Frecuencia de Ocurrencia del SW	106
Tabla 24: Frecuencia de Ocurrencia del SSW.....	106
Tabla 25: Frecuencia de Ocurrencia del WSW.....	107
Tabla 26: Combinaciones de casos a analizar	107
Tabla 27: Profundidades de Rompientes.....	118
Tabla 28: Análisis de Profundidad de Rompiente.....	119
Tabla 29: Ángulos de descrestamiento de las estructuras (NMM).....	140
Tabla 30: Ángulos de descrestamiento con marea baja y alta.....	142
Tabla 31: Clasificación de la intensidad de rompiente	146
Tabla 32: Análisis de operación de los diques.....	148
Tabla 33: Respuesta de la costa ante un dique. (USACE, 2008)	151
Tabla 34: Indicador <i>I_s</i> para la predicción de formaciones en la playa. (USACE, 2008)	152
Tabla 35: Normas y sus propiedades utilizadas en Geotubos ((Geosynthetics, 2014)	156
Tabla 36: Costos de extracción de sedimento.....	161
Tabla 37: Costos U\$/m ³ de implementación de dique sumergido.....	162
Tabla 38: Resumen de costos.....	163
Tabla 39: Resultado de Indicadores Estadísticos.....	176

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de Playa Reñaca.....	15
Figura 2: a) Vista desde Av. Jardín del Mar en los años 50. b) Vista de 1er sector mirando hacia el sur con galpón Parroquial de 1940. c) Vista de altura del 1er sector. d) Vista Aérea de la playa de Reñaca.....	16
Figura 3: Trabajos Costeros.....	17
Figura 4: Marejada 3 Julio de 2013.....	17
Figura 5: Clasificación del oleaje.....	21
Figura 6: Parámetros de una onda Fuente: Cantabria (2000).....	22
Figura 7: Perfil de la onda según distintas teorías.....	25
Figura 8: Validez de teorías.....	27
Figura 9: Esquemas de Refracción en la costa.....	29
Figura 10: Esquema de ola refractada.....	30
Figura 11: Oleaje difractado por diferentes estructuras.....	31
Figura 12: En el eje de las abscisas se encuentra el diámetro de las partículas, y en el eje de las ordenadas el parámetro de Shields.....	34
Figura 13: Transporte Longitudinal.....	35
Figura 14: Perfiles transversales.....	38
Figura 15: Curtosis.....	39
Figura 16: Asimetría.....	40
Figura 17: Clasificación de muestras.....	41
Figura 18: Superior: Ola Close-Out (Izq.) y ola con descrestamiento progresivo (der.), Inferior: Ángulo de descrestamiento.....	45
Figura 19: Índice de Vórtice.....	46
Figura 20: "Pratte's reef" California, EEUU. (32° 55' N – 118° 26' W).	50
Figura 21: "Cable Station Artificial Surfing Reef", Australia (32° 00'S - 115° 45' E).	51
Figura 22: Narrowneck Reef, Australia (27°59'S – 153°26' E).....	51
Figura 23: Mejora de Línea de costa, Narrowneck, Australia.....	52
Figura 24: "Boscombe Surf Reef", Inglaterra (50°43'N - 1°50'W).....	52
Figura 25: "Mount Maunganui Reef", Nueva Zelanda (37°38'S – 176°12'E).....	53
Figura 26: "Kovalam Reef" India (8°23'N – 76°58'E).....	54
Figura 27: Ángulo Descrestamiento (Vp: velocidad de descrestamiento; Vs: Velocidad de línea descendente; C: Celeridad de onda).....	56
Figura 28: Formas de arrecifes artificiales.....	57
Figura 29: Geometría del arrecife con y sin plataforma.....	59
Figura 30: Tómbolo.....	61
Figura 31: Saliente desarrollada detrás de estructura en el puerto de Japón.....	62
Figura 32: Parámetros para el cálculo de Saliente.....	62
Figura 33: Kayak y su equipamiento para medición.....	65
Figura 34: Prueba de funcionamiento de equipo monohaz en piscina con profundidad conocida.....	65

Figura 35: Toma de Datos en sector.....	66
Figura 36: Izquierda: Batimetría SHOA. Derecha: Levantamiento de datos con Kayak	67
Figura 37: Interpolación en Surfer.....	68
Figura 38: Malla 1000x1000[m].....	69
Figura 39: Malla 250x250 [m].....	69
Figura 40: Malla 5x5 [m].....	70
Figura 41: Ubicación de Nodo NOAA. 33° S 74° W	73
Figura 42: Tamaño de partículas en la terraza vs. Ubicación de partícula: Duna (E), Playa (P), Berma(A), Cara de playa (C) y Terraza de Bajamar (D).	82
Figura 43: Perfil idealizado perpendicular a la ribera.	83
Figura 44: Perfiles.....	86
Figura 45: Desviación Estándar de 1981 a 2012. (D50).....	93
Figura 46: Transferencia de oleaje de diseño: $H_{m0}=3[m]$ $T_p=13[s]$ $D_{irm}=SW$	109
Figura 47: Transferencia Oleaje diseño. Izq: Marea Baja, Der: Marea alta.	110
Figura 48: 1° 11 Abr 2013; 2° 20 Dic 2012; 3° 26 Sept 2012; 4° 31 May 2013; 5° 30 Ene 2014; 6° 28 Mar 2014; 7° 3 Jul 2013.....	111
Figura 49: Modelación Casos 1, 3, 4, 6, 7 y 9 con su leyenda en metros.	113
Figura 50: Concentración de energía.....	115
Figura 51: Diseño Preliminar en planta y corte.....	120
Figura 52: Batimetría del sector con dique	121
Figura 53: Implementación de dique para los 9 casos. Leyenda en metros.....	122
Figura 54: Batimetría con la implementación de dos diques sumergidos.....	127
Figura 55: Resultado de modelación con dos estructuras. Leyenda en metros.	128
Figura 56: Dimensiones del diseño final.	133
Figura 57: Batimetría de diseño final.....	134
Figura 58: Modelación de Casos con diseño final. Leyenda en metros.....	138
Figura 59: Modelación de Caso 1 con promedio de Pleas (izq.) y con promedio de Bajas (der.).....	140
Figura 60: Modelación de Clima Extremo Tr 2	143
Figura 61: Gradiente de fondo.....	145
Figura 62: Canal de acceso a dique.....	147
Figura 63: Salientes.....	154
Figura 64: Manta Anti socavación.	157
Figura 65: Área de obtención de sedimento	160
Figura 66: Dragas; Bomba Succión y Clamshell en la parte superior, Excavadora y Pinto en la parte inferior (De Izq. a der.).....	161
Figura 67: Azimut.....	176

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Datos Instituto Nacional de Estadística (INE, 2014)	18
Gráfico 2: Funciones Hiperbólicas	23
Gráfico 3: Ángulo de Descrestamiento v/s Altura de ola = Clase de surfista (números dentro del gráfico).	44
Gráfico 4: Pendiente de fondo.....	71
Gráfico 5: Dispersión de Altura de Ola.....	77
Gráfico 6: Rosa de Oleaje – Altura de ola.....	77
Gráfico 7: Dispersión de Periodo	78
Gráfico 8: Rosa Oleaje – Periodo.....	78
Gráfico 9: Histogramas.....	79
Gráfico 10: Comparación de distribuciones	80
Gráfico 11: Altura Significativa con Banda de confianza del 95%.....	81
Gráfico 12: Histograma de Frecuencia de Sedimentos	84
Gráfico 13: Tamaño Promedio de Sedimentos 1981.....	84
Gráfico 14: Porcentaje Retenido Perfil 1	88
Gráfico 15: Curva Granulométrica, Perfil 1	89
Gráfico 16: Curva granulométrica representativa	89
Gráfico 17: Tamaño Promedio 1981 v/s 2012	92
Gráfico 18: Desviación Estándar 1981v/s 2012.....	93
Gráfico 19: Comparación 1981 v/s 2012.....	94
Gráfico 20: Porcentaje pasante de Zona Sumergida.....	96
Gráfico 21: Qn por el método de CERC y de Queens.....	105
Gráfico 22: Número de Irribarren v/s Altura de ola para diferentes pendientes y períodos..	117
Gráfico 23: Pendiente v/s Altura de rompiente para $I_r = 0,95$	117
Gráfico 24: Respuesta del oleaje ante el dique y comparación sin la presencia de éste. Casos 1, 2 y 3.....	123
Gráfico 25: Respuesta del oleaje ante el dique y comparación sin la presencia de éste. Casos 4, 5 y 6.....	124
Gráfico 26: Respuesta de oleaje ante el dique y comparación sin la presencia de éste. Casos 7, 8 y 9.	125
Gráfico 27: Comparación de Oleaje ante estructura. Condiciones normales (izq.) y con estructura implementada (der.)	126
Gráfico 28: Respuesta del oleaje ante dique norte y sur. Casos 1, 2 y 3	129
Gráfico 29: Respuesta del oleaje ante dique norte y sur. Casos 4, 5 y 6.	130
Gráfico 30: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 7, 8 y 9	131
Gráfico 31: Perfil de oleaje con diques.....	132
Gráfico 32: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 1, 2 y 3.	135
Gráfico 33: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 4, 5 y 6	136
Gráfico 34: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 7, 8 y 9	137
Gráfico 35: Análisis de perfiles para Caso 1 NMM	139

Gráfico 36: Análisis de perfiles con promedio de bajas.....	141
Gráfico 37: Análisis de perfiles con promedio de pleas.....	141
Gráfico 38: Perfil de Clima extremo Tr 2.....	144
Gráfico 39: Gradiente v/s Índice de Vortex.....	146
Gráfico 40: Largo y Amplitud de la Saliente.....	150
Gráfico 41: Predicción de perfil de Saliente Norte.....	153
Gráfico 42: Predicción de perfil de Saliente Sur.....	153
Gráfico 43: Costo por metro cúbico en obras.....	162
Gráfico 44: Porcentaje Retenido en Perfil 2.....	171
Gráfico 45: Curva Granulométrica Perfil 2.....	171
Gráfico 46: Porcentaje retenido Perfil 3.....	172
Gráfico 47: Curva Granulométrica Perfil 3.....	172
Gráfico 48: Porcentaje Retenido Perfil 4.....	173
Gráfico 49: Curva Granulométrica Perfil 4.....	173
Gráfico 50: Porcentaje Retenido Perfil 5.....	174
Gráfico 51: Curva Granulométrica Perfil 5.....	174
Gráfico 52: Porcentaje Retenido Perfil 6.....	175
Gráfico 53: Curva Granulométrica Perfil 6.....	175

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1	22
Ecuación 2	23
Ecuación 3	23
Ecuación 4	24
Ecuación 5	24
Ecuación 6	26
Ecuación 7	26
Ecuación 8	26
Ecuación 9	26
Ecuación 10	26
Ecuación 11	28
Ecuación 12	28
Ecuación 13	28
Ecuación 14	30
Ecuación 15	30
Ecuación 16	31
Ecuación 17	31
Ecuación 18	31
Ecuación 19	32
Ecuación 20	32
Ecuación 21	36
Ecuación 22	37
Ecuación 23	38
Ecuación 24	38
Ecuación 25	39
Ecuación 26	40
Ecuación 27	41
Ecuación 28	42
Ecuación 29	45
Ecuación 30	48
Ecuación 31	60
Ecuación 32	60
Ecuación 33	60
Ecuación 34	61
Ecuación 35	97
Ecuación 36	100
Ecuación 37	100
Ecuación 38	100
Ecuación 39	101
Ecuación 40	102

Ecuación 41	102
Ecuación 42	145
Ecuación 43	151
Ecuación 44	152

1 RESUMEN

Reñaca es considerada uno de los balnearios más importantes a lo largo del país. Esto se ve reflejado en épocas estivales donde existe un gran afluente de turistas y comercio (INE, 2014), donde se disfruta de todo tipo de entretenimiento como deportes, música, eventos y relax. A pesar del éxito turístico que presenta la playa, esta no cuenta con las mejores condiciones para el baño. La playa se divide en 5 sectores nombrados de forma ascendente de sur a norte, separados por terrazas/restaurants. El primer sector se encuentra a un costado de la desembocadura del estero de Reñaca, y cada año experimenta una disminución en el ancho de la playa entre abril y julio (Molina, 2014) lo que está relacionado con los sobrepasos invernales durante marejadas que llegan hasta la avenida Borgoño provocando la pérdida de arena, molestias en el tránsito y daños a la infraestructura pública, privada y concesionada. Un proyecto de mejoramiento de la playa considerando un aumento de la berma existente y la disipación parcial del oleaje para prevenir la erosión y mejorar las condiciones de baño y surf en el sector sur presentaría beneficios públicos para la municipalidad, la industria inmobiliaria, turística, y la seguridad de los usuarios. El proyecto presenta el estudio e implementación de distintas alternativas de estructuras mediante los métodos de Hearin (2009) y Alday (2014), finalmente se generan diferentes costos con el fin de entregar una variedad de opciones para su implementación.

2 INTRODUCCIÓN

Reñaca es un balneario ubicado en la ciudad de Viña del Mar cuenta con una extensión de 1,2 [km] aproximadamente, se ubica a un costado de la desembocadura del estero Reñaca (ver Figura 1). Se caracteriza por ser uno de los más importantes del litoral central de Chile.

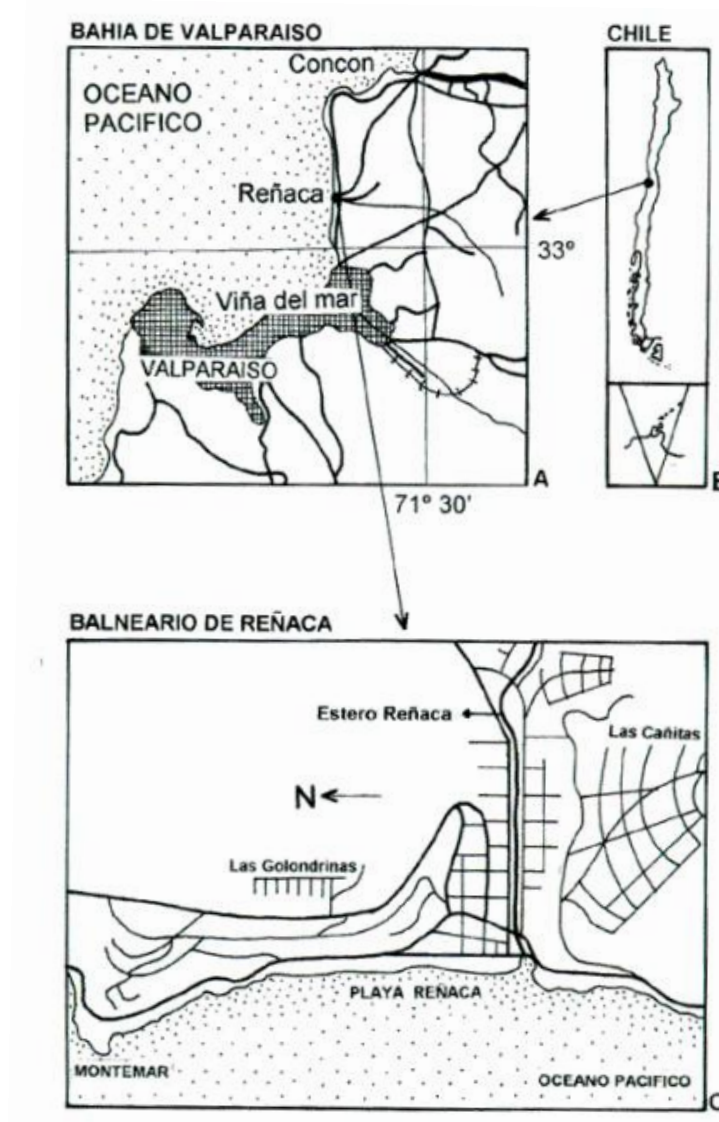


Figura 1: Ubicación de Playa Reñaca

Fuente: (Cristina San Martín, 2014)

Las condiciones del oleaje son en gran parte del tiempo, no muy favorables para el baño, presentando un alto riesgo para los bañistas.

Años atrás no se contaba con la presencia del puente de la Av. Borgoño que pasa sobre la desembocadura del estero de Reñaca, por lo que existía una berma más extensa y una

pequeña laguna en la parte trasera como se aprecia en las imágenes de la Figura 2 de mediados del siglo 20. La vista aérea muestra que se le ha ido quitando espacio a la playa, reduciendo su tamaño hoy en día.

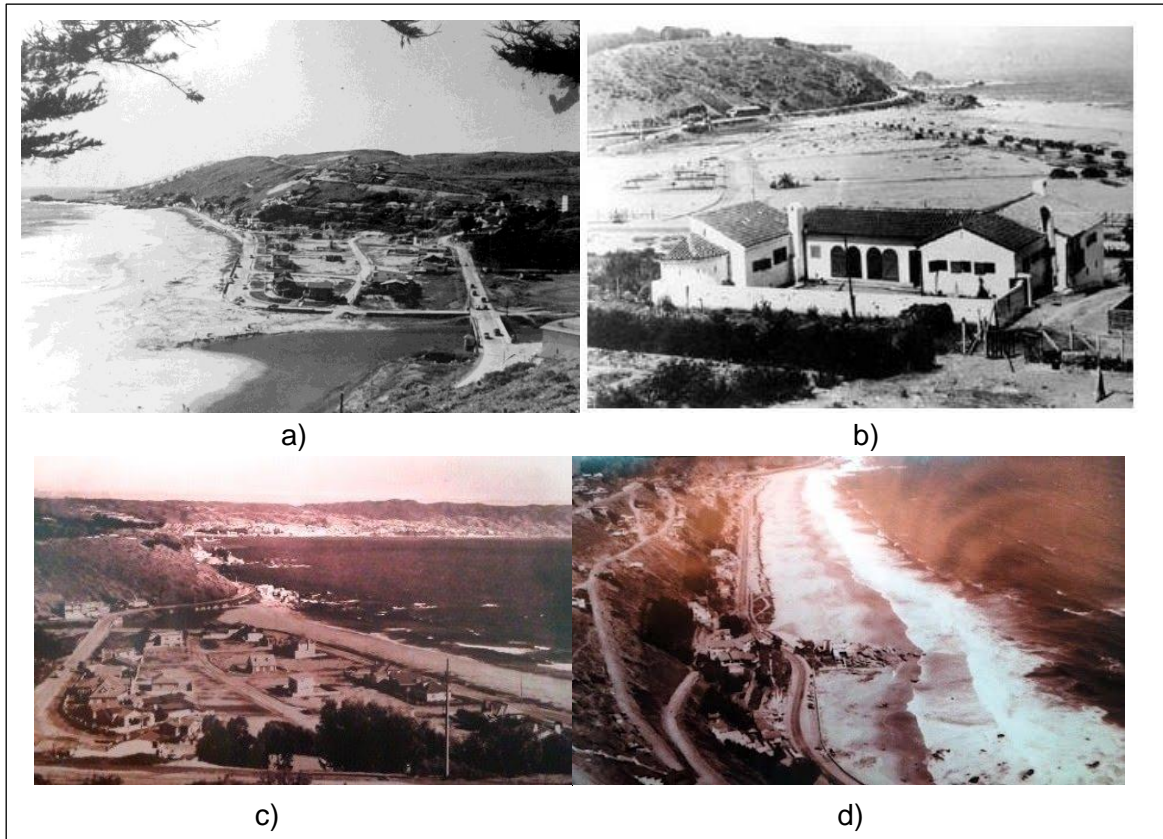


Figura 2: a) Vista desde Av. Jardín del Mar en los años 50. b) Vista de 1er sector mirando hacia el sur con galpón Parroquial de 1940. c) Vista de altura del 1er sector. d) Vista Aérea de la playa de Reñaca
Fuente: Galeon (2014) y Panoramio (2014)

En épocas estivales, la playa resulta ser una de las más visitadas por los turistas, siendo que no es la playa con las mejores condiciones para el baño, a pesar de esto, el quinto sector de la playa cuenta con el surf como uno de sus principales atractivos, donde se puede encontrar comercio relacionado y en verano se realizan competencias nacionales de dicho deporte. Recientemente (El Mercurio, 2014) se habilitaron nuevos paseos y mejoras en algunos ya existentes a lo largo de la playa. La Figura 3 muestra los trabajos y movimientos de arena que se llevaron a cabo.



Figura 3: Trabajos Costeros

Fuente: Elaboración Propia

Como resulta de costumbre, en ocasiones extremas, el mar tiende a llegar más lejos, y estas nuevas estructuras que no fueron reforzadas y protegidas para eventos con periodo de retorno de alrededor de dos años, se ven afectadas. Como ocurrió el 3 de julio del 2013, donde el mar sobrepasó la berma llegando a la avenida Borgoño sin problema alguno, llevándose a su paso partes del nuevo paseo y anegando los locales comerciales ubicados en la misma Avenida. La Figura 4 muestra los efectos y daños de la marejada.



Figura 4: Marejada 3 Julio de 2013

Fuente: Elaboración Propia

Al estudiar los hechos pasados, existe al menos un encabezado por año que habla sobre marejadas en el sector, por lo que no es un hecho poco conocido.

Por otro lado, los datos del INE reflejan que existe un aumento en los últimos 5 años de la población flotante que visita la V región (no exclusivamente a la playa Reñaca), tanto en la época de verano, como en el resto del año como se aprecia en el Gráfico 1.

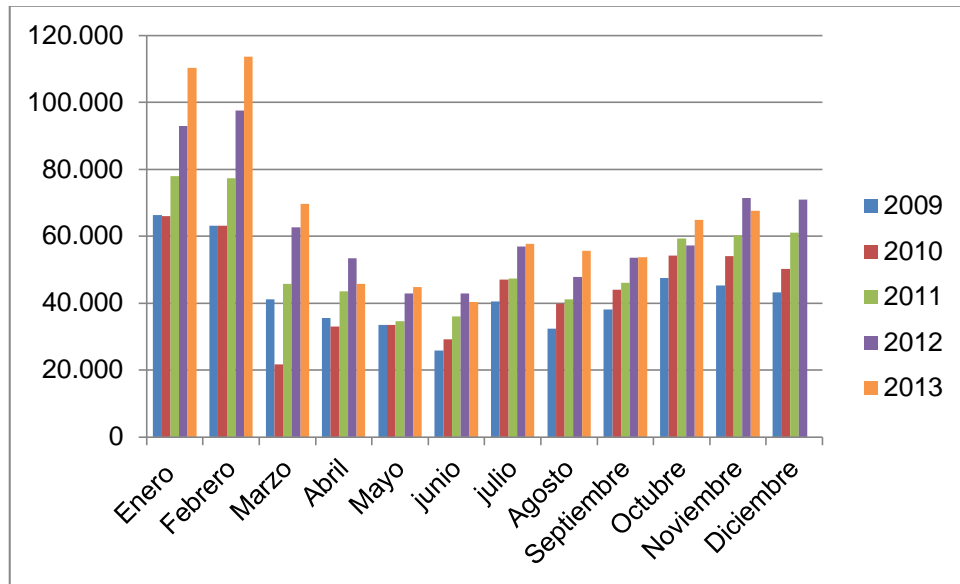


Gráfico 1: Datos Instituto Nacional de Estadística (INE, 2014)

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, como ya es sabido, el surf se ha convertido en un deporte mucho más atractivo en la última década, siendo hoy en día una importante fuente de ingresos para la industria comercial a sus alrededores para muchos países con extensas costas, pues el surf resulta ser un deporte mayormente realizado por gente con mayores ingresos, pues contar con el equipo adecuado y trasladarse a los lugares donde se practica puede resultar un poco costoso.

Las formas convencionales de proteger la costa, como diques con enrocados parecen implicar algunas desventajas en el ámbito ambiental. Una innovadora e interesante forma de mejorar las capacidades del surf y contribuir a proteger la costa es un arrecife artificial multifuncional. Estas estructuras sumergidas cumplen varios propósitos, en particular, puede mejorar las condiciones existentes de surf y también el valor ambiental del sector. Este tipo de estructura cuenta con nuevos aspectos prometedores. En primer lugar, proporciona un impacto visual nulo, en segundo lugar, ofrece beneficios turísticos y económicos mediante la mejora de las condiciones surfeables, tercero, mejora el valor medioambiental del área

donde se construya ya que al utilizar geotextiles, la flora y fauna es atraída a esta superficie, y cuarto, si se diseña correctamente, la erosión de la playa puede ser controlada.

El proyecto entregará indicaciones sobre la viabilidad de la realización de esta estructura.

3 OBJETIVOS

3.1 GENERAL

Realizar una evaluación técnico-económica a nivel preliminar de alternativas de mejoramiento de las condiciones para la práctica de surf y el control de la erosión en el sector sur de la playa Reñaca con el fin de mejorar el sector.

3.2 ESPECÍFICOS

- Recopilar datos del sector (batimetría, estadísticas de oleaje de largo plazo, mediciones oceanográficas, meteorológicas y sedimentológicas, fotografías aéreas y satelitales, estudios existentes, evaluación histórica de los terrenos, etc.).
- Estudiar el oleaje y lograr reproducir la situación actual, mediante propagación, transformación y rotura de oleaje utilizando el modelo numérico espectral SWAN.
- Estudiar la evolución morfológica de la playa.
- Revisar y aplicar metodologías y criterios de diseño de playas artificiales y de rellenos, de rompeolas sumergidos y de creación de arrecifes para surf.
- Estimar el costo de las alternativas.
- Entregar recomendaciones sobre la viabilidad de la realización del proyecto.

4 MARCO TEÓRICO

4.1 OLEAJE

Una onda corresponde a la propagación de una perturbación en el medio el cual puede ser aire, agua, sólidos o vacío. En hidráulica marítima, oleaje desplaza energía sobre la superficie del agua y masa en menor cantidad. Según el tipo de perturbación, las olas se clasifican por el período que presenten según la Figura 5.

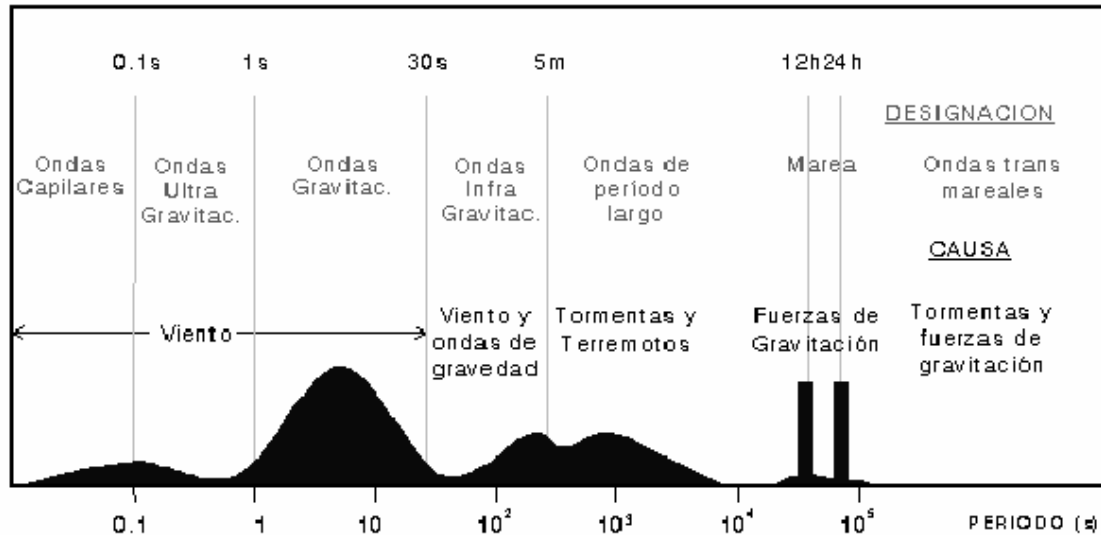


Figura 5: Clasificación del oleaje

Fuente: Cantabria (2000)

Como se puede apreciar en la Figura 5 las causas que generan el oleaje y ondas en la superficie del mar corresponden al viento, las tormentas, los terremotos, la fuerza de gravedad, la rotación de la tierra, la atracción de la luna y el sol y por otro lado están las fuerzas que restauran estas perturbaciones como la tensión superficial, la gravedad, coriolis y la fricción. (Cantabria, 2000)

Al describir de forma matemática una onda, se dice que son oscilaciones uniformes y periódicas de la superficie del agua, por lo que se asume que se repiten constantemente, distinguiéndose dos tipos de oscilaciones: progresivas y estacionarias.

Las ondas progresivas se caracterizan por propagarse en una profundidad constante manteniendo su forma, por otro lado, las ondas que no se propagan se les denomina estacionarias.

Una onda se caracteriza por tener una longitud (L), un período (T) y una Altura ($H = A_c + A_s$). Se puede tomar como referencia el nivel medio (NM) o el nivel de reducción (NR) como se representa en la Figura 6. El desplazamiento vertical de la superficie del fluido con respecto a estos niveles, se le conoce como desplazamiento de la superficie libre (η).

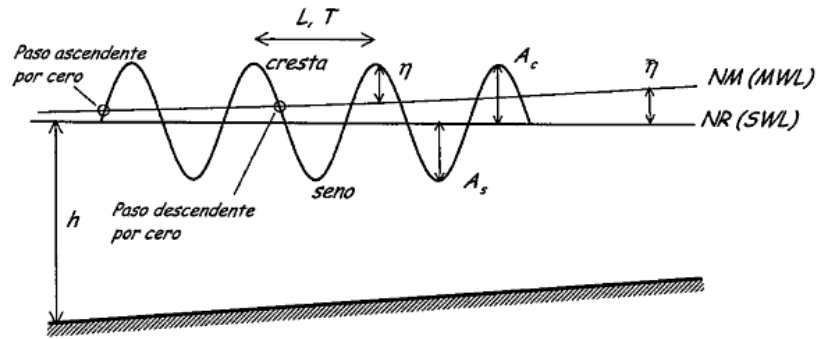


Figura 6: Parámetros de una onda
 Fuente: Cantabria (2000)

El periodo se define mediante la observación del paso de un punto idéntico de la onda por una referencia fija a lo largo del tiempo, y si se toma una imagen de la superficie libre en un momento determinado, se puede definir la longitud de onda entre dos puntos idénticos sucesivos.

El punto donde la superficie libre alcanza su máximo, se le denomina cresta, y cuando alcanza su mínimo se le llama seno. La distancia que existe entre estos dos puntos se le denomina altura de onda ($A_c + A_s$).

La velocidad o celeridad (C) de la onda es el cociente de la longitud de onda sobre el período.

Las ondas se caracterizan por presentar gran cantidad de formulaciones matemáticas para describir su movimiento oscilatorio.

Este proyecto presenta mayor relevancia en las ondas generadas por viento, por lo que se le dará más importancia al desarrollo de este fenómeno.

El viento genera olas locales (seas), las que pueden viajar en distintas direcciones, o puede generar olas que se propagan desde mar abierto (swell), siendo estas últimas más regulares que las anteriores.

La altura de onda va a depender de la energía transferida a la superficie del agua por el viento en la zona de generación, por lo que si el viento es más intenso, la ola será más alta.

El período y la longitud de onda pueden ser expresados en términos de sus recíprocos, la frecuencia angular de onda $\omega = 2\pi/T$ y el número de onda $k = 2\pi/L$. El vector número de la onda tiene magnitud k y apunta en la dirección de propagación de la onda, es decir, perpendicular a las crestas de las olas superficiales. Con las definiciones anteriores se obtiene la velocidad de onda:

Ecuación 1

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k}$$

La longitud de onda L es una función de T y C una función de L . Dado esto, las ondas largas viajan más rápido que las cortas. El estudio de las olas generadas pro viento es simplificado tratándolas como ondas de pequeña amplitud, lo que significa que la inclinación o pendiente

de la onda (la razón de la altura H a la longitud de onda L) es menor de $1/20$ en situaciones ideales. En situaciones reales, la inclinación de las ondas de amplitud pequeña es de $1/50$. Para una onda progresiva, el desplazamiento vertical de la superficie libre η está dada por:

Ecuación 2

$$\eta = A \cos \left[\frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \right] = A \cos[kx - \omega t]$$

En la Ecuación 2, x corresponde a la posición y t al tiempo. El argumento $[kx - \omega t]$ representa a la fase de la onda y toma valores entre 0 y 2π desde una cresta a la siguiente en un punto fijo o desde un seno a otro en un tiempo determinado. La velocidad a la cual el argumento se propaga, o velocidad de fase C se obtiene de las ecuaciones de movimiento, donde se asume que la onda es progresiva, incompresible y sin rotación, obteniendo:

Ecuación 3

$$C = \left[g \frac{L}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{L} h \right]^{1/2} = \left[\frac{g}{k} \tanh kh \right]^{1/2}$$

El comportamiento de las funciones hiperbólicas se puede apreciar a continuación en el Gráfico 2

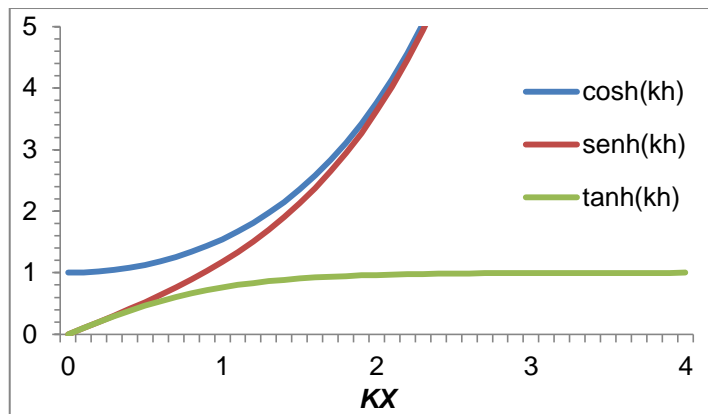


Gráfico 2: Funciones Hiperbólicas

Fuente: Elaboración Propia

Una onda en aguas profundas está determinada por $L < 2h$, es decir, cuando la longitud es más pequeña que dos veces la profundidad del agua, también se le denomina onda corta. Dado esto, L es menor y kh es mayor, luego $\tanh(kh)$ tiende a 1. Por lo tanto C se puede redefinir como:

Ecuación 4

$$C = \sqrt{g \frac{L}{2\pi}} = \sqrt{\frac{g}{k}}$$

Una onda en agua somera se determina por $L > 20h$ y se le conoce también como onda larga. Esto significa que la longitud de onda es larga, por lo tanto, $\tanh(kh)$ tiene a kh . Finalmente la velocidad de fase queda determinada para aguas someras como:

Ecuación 5

$$C = \left[\frac{g}{k} (kh) \right]^{1/2} = \sqrt{gh}$$

Esta última ecuación no depende de L sino de la profundidad local. Lo que implica una relación importante, pues las ondas largas como las de marea que se propagan sobre áreas costeras tendrán velocidades de fase que son proporcionales a la raíz cuadrada de la profundidad del agua.

Por otro lado, también existen las ondas intermedias, donde su velocidad de fase está dada por la Ecuación 3 y el rango de profundidades que determina esto, aumenta con la longitud de onda.

En general, las teorías que se utilizan para describir el oleaje, son sólo aproximaciones a la realidad. Para aplicar una teoría de oleaje es necesario adoptar ciertas condiciones para que se cumplan, condicionando el campo cinemático y dinámico de dichas teorías, proporcionando distintos perfiles de onda como se aprecia en la Figura 7. (Cantabria, 2000)

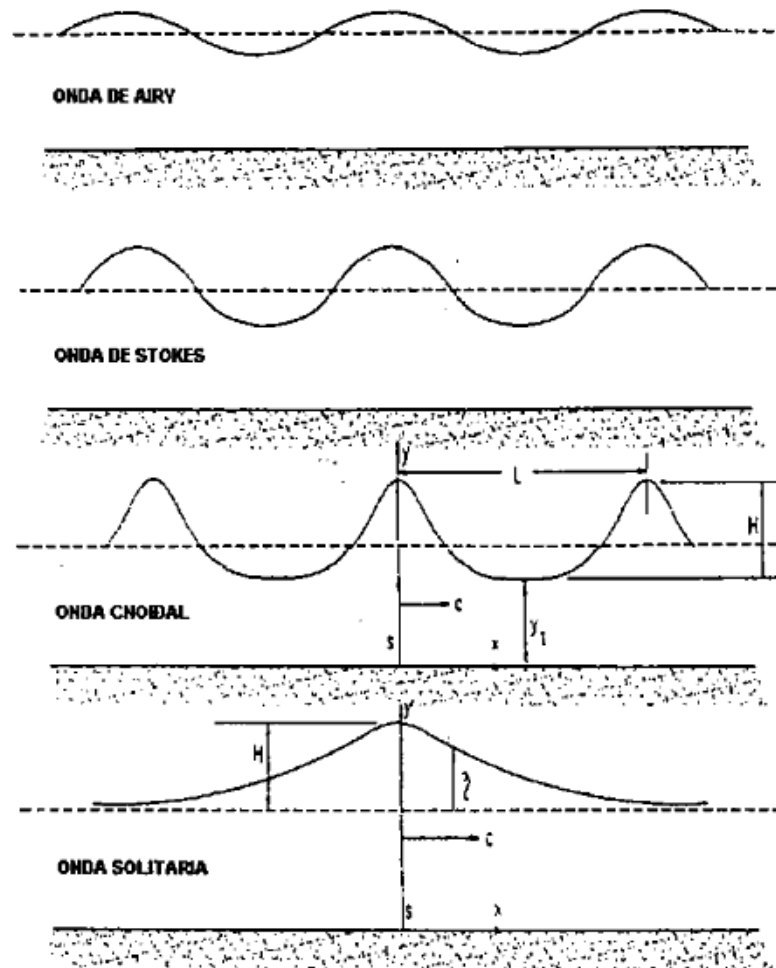


Figura 7: Perfil de la onda según distintas teorías

Fuente: Cantabria (2000)

La teoría de Airy es una de las más simples, su nombre se debe a su autor y resulta útil para describir el oleaje y sus fenómenos principales. Esta teoría se basa en las siguientes hipótesis:

- La tensión superficial del agua puede ser despreciada.
- El agua se considera homogénea e incompresible.
- El efector Coriolis puede ser despreciado.
- La presión en la superficie del agua es uniforme y constante.
- El agua de mar carece de viscosidad.
- No existe interacción del oleaje con ningún movimiento marino. El flujo es irrotacional.
- El fondo marino se considera como un límite horizontal, fijo e impermeable por lo que la velocidad vertical es nula.
- La amplitud de onda es reducida y su forma no varía en el espacio y tiempo.
- Las ondas son planas (de dos dimensiones).

Con respecto a que el agua de mar se considera incompresible, se analiza que las líneas de corriente de este fluido son paralelas, por lo que la ecuación de conservación de masa dice que:

Ecuación 6

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

Como la densidad es constante en el tiempo, finalmente se obtiene:

Ecuación 7

$$\nabla \cdot (\vec{u}) = 0$$

Al ser un flujo irrotacional, los campos se derivan de un potencial, obteniéndose las velocidades horizontales y verticales como se presenta a continuación:

Ecuación 8

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad ; \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

Esto implica que si se conoce el potencial $\phi(x, z, t)$ en todo el ámbito del estudio, se puede conocer también las velocidades de las partículas.

Finalmente, en función del número de onda (k) y la frecuencia angular (ω), la longitud de onda (L) se describe como:

Ecuación 9

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) = \frac{gT}{\omega} \tanh(kh)$$

Para poder clasificar la validez de las distintas teorías del oleaje se utiliza un parámetro adimensional conocido como el Número de Ursell, y está definido por la siguiente ecuación:

Ecuación 10

$$U_r = H \frac{L^2}{d^3}$$

Cabe destacar que este número se puede definir en función de la amplitud o el número de onda en vez de la altura y longitud respectivamente. Dando esto y aunque conceptualmente el significado del parámetro es siempre el mismo, sus valores variarán de forma considerable por lo que es preciso tener clara la definición empleada antes de realizar cualquier interpretación.

Finalmente, el número de Ursell se utiliza para definir el régimen al que corresponden las ondas con las que se está trabajando, y por lo tanto ayuda a seleccionar la teoría más adecuada.

Le Méhauté (1976) propone mediante dos parámetros adimensionales la Figura 8, en la cual se presentan las áreas de validez de las diferentes teorías de oleaje.

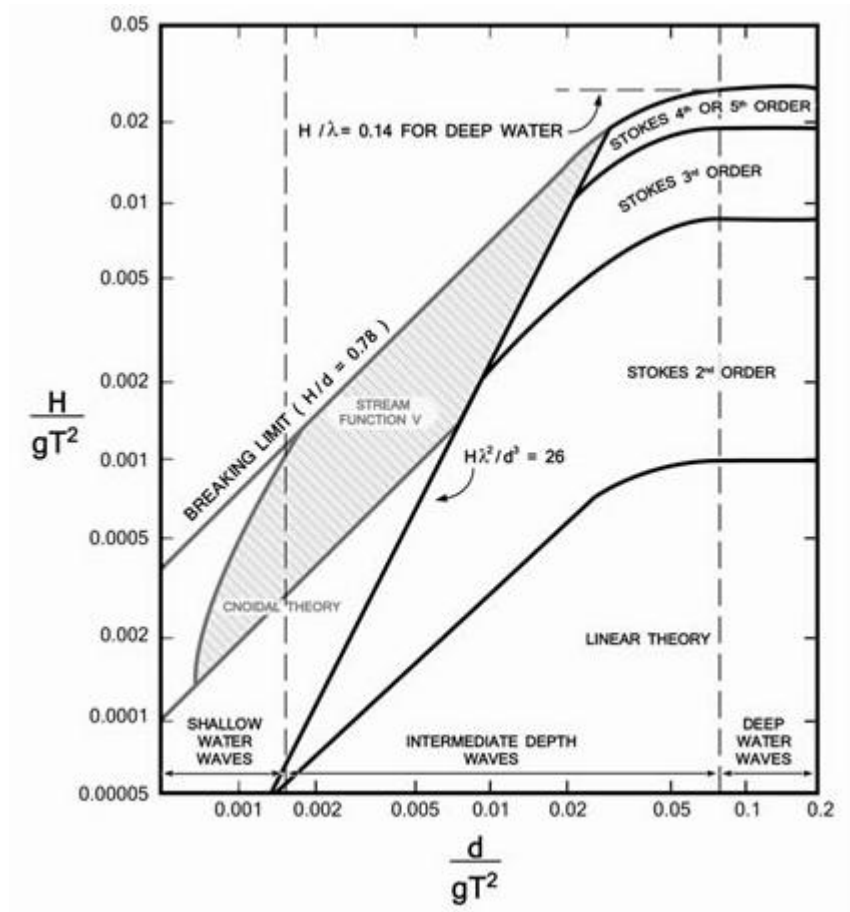


Figura 8: Validez de teorías

Fuente: Le Méhauté, 1976

Dentro de las teorías más utilizadas se tiene:

- Teoría Lineal Oleaje (TLO)
- Teoría de Stokes
- Teoría Cnoidal

4.2 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE LLEGANDO A LA COSTA

Cuando el oleaje comienza a acercarse a la costa, este inicia una serie de cambios debido a la interacción que tiene con el fondo. Según la teoría lineal, se deduce que la ola siente el fondo cuando la profundidad en la que se encuentra es $h < L/2$ siendo L la longitud de la onda.

Estos cambios se aprecian en variaciones en la altura de ola y en la dirección de propagación, los fenómenos asociados serán descritos a continuación:

4.2.1 Shoaling

También conocido como asomeramiento, y corresponde a la variación de la profundidad lo que se traduce en un cambio en la altura y la longitud de la onda.

Para resolver este fenómeno, es necesario plantear un problema de contorno con fondo variable cuya resolución analítica es compleja, especialmente si la teoría de ondas utilizada es no lineal. Sea cual sea la teoría utilizada, el fenómeno de shoaling se plantea asumiendo que el proceso es bidimensional, y que el período de la onda y su flujo de energía son constantes en la dirección que se propaga. También asume que la variación del fondo sea suave para que no se produzca reflexión y que no se produzca disipación de energía por fricción en el fondo.

Si se considera una onda que se propaga de una profundidad mayor d_2 con una altura de H_2 a una profundidad menor d_1 se definirá altura de ola H_1 como:

Ecuación 11

$$H_1 = H_2 \sqrt{\frac{C_{g2}}{C_{g1}}}$$

El coeficiente de Shoaling, K_s queda definido como la raíz de las celeridades de grupo o como:

Ecuación 12

$$K_s = \frac{H_1}{H_2}$$

Para el caso de aguas profundas se tiene:

Ecuación 13

$$K_s = \left[\frac{1}{\sqrt{2n \tanh \frac{2\pi d}{L}}} \right] ; \quad n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi \frac{d}{L}}{\sinh(4\pi \frac{d}{L})} \right]$$

4.2.2 Refracción

Este fenómeno aparece cuando el tren de olas que se aproxima oblicuamente a los veriles de la costa, y encuentra un cambio de profundidad, por lo que una parte de este frente se encuentra en aguas someras lo que se resumen en menor celeridad que el resto, proporcionándole un cambio en su dirección. Por otro lado se puede encontrar refracción ante la presencia de una corriente, la que produce un retraso de una parte del frente de ola generando un cambio de dirección.

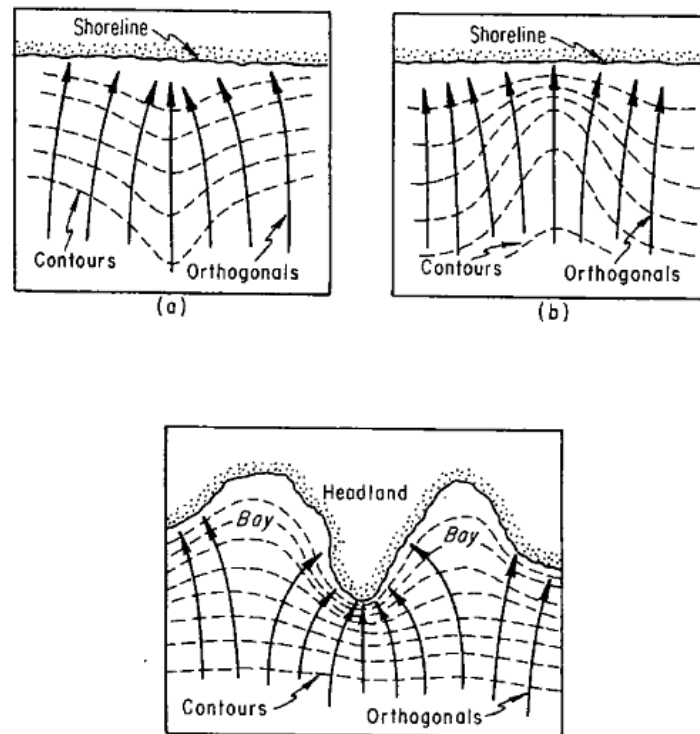


Figura 9: Esquemas de Refracción en la costa

Fuente: Cantabria (2000)

Los rayos giran tendiendo a ser ortogonales a las líneas de batimetría a medida que disminuye la profundidad. En el caso de encontrarse en un bajo, los rayos tenderán a converger con un aumento considerable de la altura de la ola en dicha zona. Como se observa en la Figura 9, el efecto es contrario si se encuentra con una depresión en el fondo o un cañón submarino ya que los rayos tenderán a girarse en la dirección de las aguas someras, divergiendo los rayos, disminuyendo la altura de ola.

Se puede considerar que el flujo medio total de energía entre dos ortogonales se mantiene constante, se puede demostrar que:

Ecuación 14

$$H^2 C_g b = cte$$

Dado esto, si se considera la propagación del oleaje entre dos puntos como se observa en la Figura 10, y basándose en que el periodo de la onda permanece constante se obtiene la Ecuación 15, donde la relación b_1/b_2 corresponde a todos los efectos en planta que transforman al oleaje, y la raíz de esta, se define como el coeficiente de refracción, el resto, a los efectos en sección.

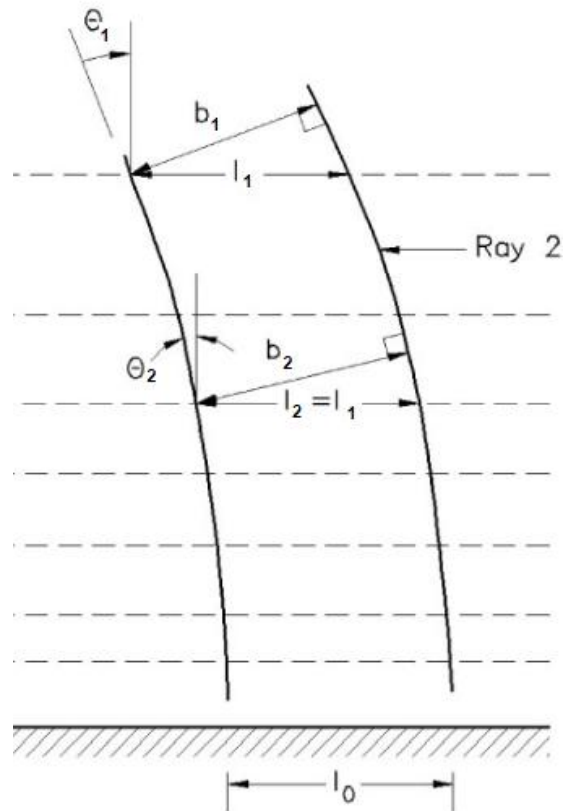


Figura 10: Esquema de ola refractada

Fuente: Coastal Engineering Manual (2003)

Ecuación 15

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1 \tanh\left(\frac{2\pi d_1}{L_1}\right) b_1}{n_2 \tanh\left(\frac{2\pi d_2}{L_2}\right) b_2}}$$

Coeficiente de refracción:

Ecuación 16

$$K_r = \sqrt{\frac{b_1}{b_2}}$$

Para relacionar el ángulo con el que incide el oleaje con el ancho entre las ortogonales, se utiliza la siguiente ecuación, esto mediante la Ley de Snell.

Ecuación 17

$$\frac{\sin \theta}{b} = cte$$

Utilizando esta constante, se obtiene que la proporción b_1/b_2 se puede expresar en términos de la proporción de los senos del ángulo de incidencia ($\sin \theta_1 / \sin \theta_2$). Por lo que finalmente se expresa la altura del oleaje en un punto cualquiera que sólo ha sido afectada por refracción, en función de la altura de ola costa afuera, como se expresa a continuación:

Ecuación 18

$$H = H_0 K_r$$

4.2.3 Difracción

Se caracteriza por ceder energía a lo largo de la cresta, de manera transversal a la dirección de propagación del oleaje, llegando a quedar perpendicular a la dirección predominante de propagación. Esto se produce cuando el frente de olas se encuentra con una estructura o en zonas cuando existen efectos pronunciados del fondo como se puede apreciar en la Figura 11

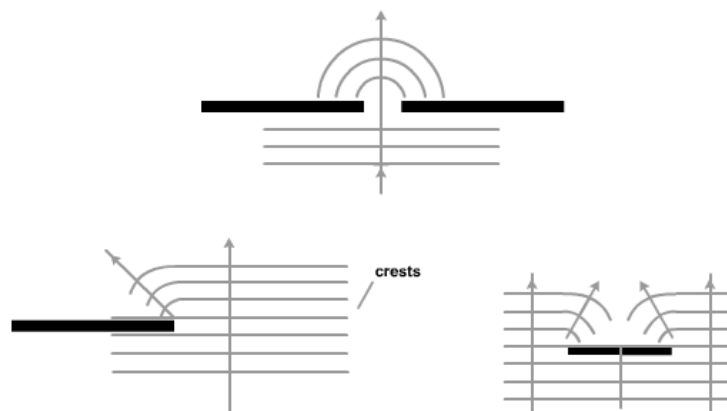


Figura 11: Oleaje difractado por diferentes estructuras.

Fuente: BBC (2014)

Para obtener el oleaje difractado, se utiliza el coeficiente K_d , el cual se puede calcular teóricamente, pero en la práctica se recurre a datos empíricos como los diagramas de Wiegel (1962) o la modelación numérica mediante técnicas no lineales.

Ecuación 19

$$H_1 = K_d H_2$$

4.2.4 Reflexión

A medida que el frente de oleaje se aproxima a la costa, este comienza a ser susceptible de verse transformado por la reflexión debido a estructuras naturales o artificiales. La reflexión que se produce por playas, acantilados y diques, puede cambiar considerablemente el campo de ondas inducido por las ondas incidentes. La reflexión puede dar lugar a desplazamiento de la zona de rotura, a cambios en el nivel de disipación en la playa como el set-up, las corrientes y el transporte de sedimento.

Por otro lado, este fenómeno tiene gran importancia dado que las ondas reflejadas que viajan en dirección a mar abierto, pueden quedar atrapadas por efecto de la refracción, cuya presencia puede tener grandes consecuencias sobre la morfodinámica de la playa.

El cociente entre la altura de ola reflejada y la incidente, se conoce como el coeficiente de reflexión:

Ecuación 20

$$K_r = \frac{H_{Reflejada}}{H_{Incidente}}$$

4.3 METODOLOGÍA DE PROPAGACIÓN: MODELO SWAN

Para desarrollar la propagación, transferencia y rotura del oleaje se utiliza modelo de tercera generación SWAN (Simulation Waves Nearshore) que está desarrollado para oleaje espectral de lagos, estuarios y zonas costeras con información dada de corrientes, vientos y batimetría.

El oleaje es interpretado a través de la formulación Euleriana del espectro bidimensional de densidad de acción, incluso en la zona de rompiente donde existe predominancia de los fenómenos no lineales.

Una de las características del modelo es utilizar anidados, es decir, modela una malla de gran tamaño, luego una menor dentro de esta misma mejorando y aumentando la resolución hasta llegar al punto deseado, esta opción se realice cuanto se estime. Las mallas que van anidadas utilizan las condiciones de borde entregadas por el cálculo anterior (malla más grande).

Finalmente el modelo puede ser utilizado en cualquier escala donde se cuente con oleaje generado por viento.

Dentro de las limitaciones que presenta el modelo se tiene:

- La difracción es modelada en sentido restringido, es decir, el modelo debe ser usado en zonas donde la variación de la altura significativa sea grande con respecto a varias longitudes de onda.
- No calcula las corrientes inducidas por el oleaje, en caso de ser muy relevante, se introduce como entrada al modelo.
- “La aproximación numérica (LTA) de las interacciones onda-onda mediante triadas depende de la anchura del espectro direccional. Los parámetros por defecto parecen funcionar razonablemente bien”. (Granada, 2009)
- “La aproximación numérica (DIA) de la interacción onda-onda depende de la anchura del espectro direccional y de la resolución en el espectro de frecuencias. Llega a ser mala aproximación cuando el rango de frecuencias tiene una relación tal que $\sigma_{min}/\sigma_{max} \neq 10\%$ ”. (Granada, 2009)

4.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Corresponde a uno de los procesos litorales más importantes al momento de estudiar proyectos costeros como regeneraciones de playa y erosiones, pues la acción marina modifica constantemente la franja costera mediante procesos como la acumulación, el transporte y la erosión, siendo la energía del mar el principal precursor de las modificaciones, esto a través de las mareas, el oleaje, el viento y las corrientes litorales.

La zona de rompiente determina la estabilidad y evolución de la playa, dado que aquí es donde existe una mayor cantidad de energía que es capaz de mover el sedimento y transportarlo tanto longitudinal como transversalmente a la playa.

Dependiendo del tamaño de las partículas del lecho y de las condiciones del flujo, el transporte de sedimentos puede realizarse como carga por fondo o carga por suspensión. En términos generales se pueden distinguir tres tipos de movimiento de partículas:

1. Rodadura y deslizamiento.
2. Saltación.
3. Suspensión.

Una vez que se supera la tensión tangencial, es cuando las partículas inician su movimiento, rodando y deslizándose una sobre otra, sin perder el contacto con el fondo. Al incrementarse esta tensión, las partículas comienzan a mover en saltos regularmente, logrando formar una lámina de fluido/sedimento cercana al fondo, con una altura y concentración que la caracteriza, de esta forma se denomina saltación. Y por último, cuando la velocidad de corte excede un cierto valor de la velocidad de caída del grano, éste es levantado del fondo, donde las fuerzas turbulentas exceden el peso sumergido de la partícula, quedando ésta en suspensión. Esto definido para flujos estacionarios. (Cantabria, 2000)

El flujo oscilatorio, es cuando se cambia de dirección dentro de un intervalo de tiempo regular definido por la periodicidad del fenómeno al que está asociado

El parámetro de Shields (Figura 12) indica cuando una acumulación de granos comienza a moverse en un flujo.

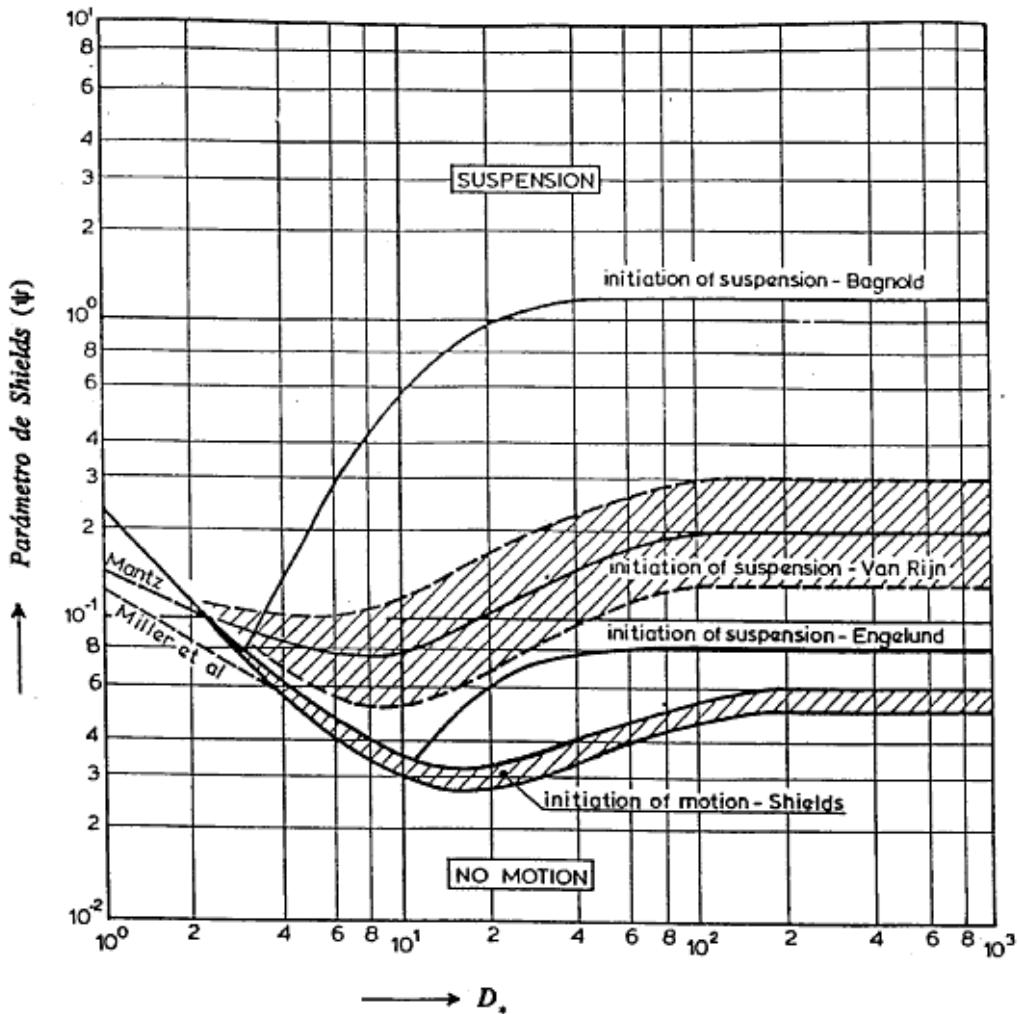


Figura 12: En el eje de las abscisas se encuentra el diámetro de las partículas, y en el eje de las ordenadas el parámetro de Shields.

Fuente: Cantabria (2000)

4.4.1 Transporte Longitudinal

La corriente de transporte longitudinal forma un verdadero río de arena que fluye de forma casi paralela al litoral, esto se produce cuando la oblicuidad con la que el oleaje de rotura enfrenta a la costa, esto se puede observar en la Figura 13 . Por ello, el transporte no presenta un volumen constante. Su dirección es paralela a la del litoral, mientras que su sentido y volumen son variables en función de la intensidad y dirección de propagación de los temporales, así como de la orientación del tramo de costa considerado.

La corriente de transporte sólido longitudinal neto corresponde a un punto estudiado durante un determinado tiempo, generalmente un año o más, del cual se obtiene la diferencia entre los volúmenes de transporte que se han registrado en ambos sentidos en dicho tiempo. Esto

suele medirse en metros cúbicos al año indicándose la dirección y sentido. Por otro lado, existe en el interior de las bahías (y en mayor o menor medida, a sotamar de cualquier obstáculo) un movimiento de material granular generado por la diferencia de altura de ola en un mismo frente de oleaje. El fenómeno de difracción hace que, a la sombra del obstáculo ya sea natural o artificial, disminuya su energía por reducción de su altura. Ambos tipos de transporte sólido dependen de la forma en planta de la bahía. (Villaverde, 1998).

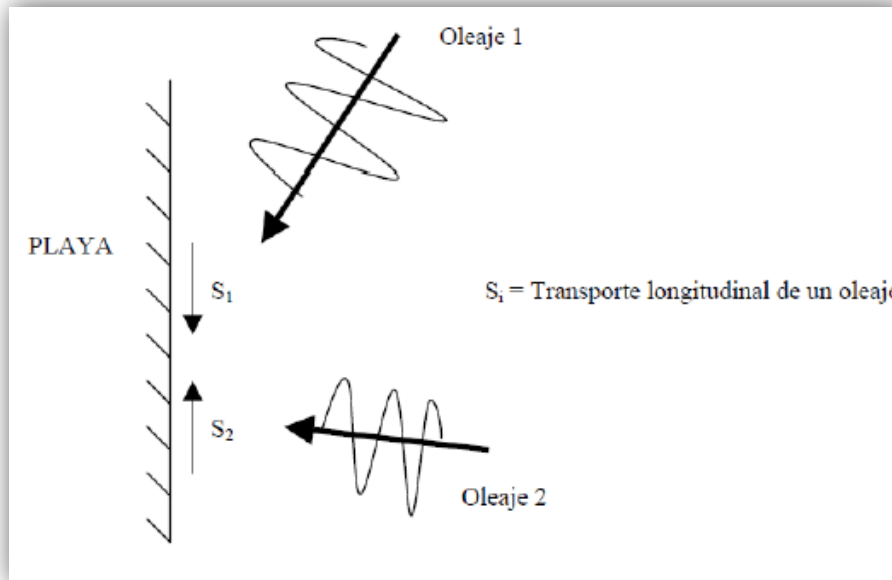


Figura 13: Transporte Longitudinal

Fuente: Villaverde (1998)

El transporte longitudinal se caracteriza por ser responsable de la mayoría de los cambios morfodinámicos de las playas a largo plazo, dado esto se pueden definir los siguientes conceptos:

- **Transporte Potencial Longitudinal de Sedimentos:** Este representa a la tasa máxima que puede ser transportada por el oleaje.
- **Transporte real longitudinal de sedimentos:** determina la cantidad de sedimento que realmente se está moviendo.
- **Transporte bruto:** hace referencia al movimiento total que existió en la playa en un determinado tiempo, esto, sin considerar la dirección en la cual se hizo. Se obtiene con la sumatoria de los valores absolutos de cada transporte.
- **Transporte neto:** como se mencionó anteriormente, este transporte considera la cantidad de sedimento que realmente se movió en la playa, dado esto, al momento de calcularlo, se hace una sumatoria incluyendo los signos de cada transporte.

Para poder determinar el transporte longitudinal, existen diversas formulaciones basadas en distintas hipótesis de partida (Flujo de energía o determinación del campo de corrientes). Una de las formulaciones más utilizadas es la creada por el Coastal Engineering Research Center (CERC,1984), el cual define transporte potencial como:

Ecuación 21

$$Q_l = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16k^{1/2}(\rho_s - \rho)(1 - n)} \right) H_b^{5/2} \sin(2\alpha_b)$$

Donde:

K : Coeficiente de proporción.

ρ : Densidad de mar.

g : Gravedad

ρ_s : Densidad del sedimento.

k : Índice de rompimiento.

n : Porosidad del sedimento.

H_b : Altura de oleaje rompiente.

α_b : Ángulo de incidencia de la rompiente.

Con el fin de calcular las capacidades de transporte que posee una playa a partir de información como el clima marítimo y las características batimétricas se utilizará el método de CERC.

Esta formulación estima el transporte litoral sobre la costa, utilizando las alturas de ola, el ángulo de incidencia con respecto a la orilla y las longitudes y periodos de cada ola, todo esto basado en una fórmula empírica con ajustes experimentales. Las ventajas de esta metodología son:

- Es aplicable a tramos de costa.
- Puede ser usada para diversos alineamientos de playa dentro de un área de estudio.
- No requiere levantamientos detallados de las características locales, apenas un conjunto de datos estadísticos de las ondas o alineamientos de la costa.

Para utilizar este método, se determina el azimut en un punto de la playa

Además de esta formulación, existen otras ampliamente empleadas tales como Bagnol (1981), van Rijn (1986) y Kamphuis (1990) (Fórmula de Queens).

De todos modos se debe considerar que la cantidad de partículas en movimiento también es un parámetro que puede ser medido directamente en la zona de estudio.

4.4.2 Transporte Transversal

Este transporte se caracteriza por el movimiento del sedimento en forma perpendicular a la línea de costa, generando un enriquecimiento de arenas en la época de verano y un empobrecimiento en invierno. Conocido también como comportamiento estacional de la playa lo que genera la creación de barras a lo largo del perfil transversal de la playa. (Villaverde, 1998)

Este transporte se asocia a fenómenos cercanos al perfil. El viento, el oleaje y las mareas actúan principalmente sobre este, pues suministran energía al ambiente costero causando cambios en el perfil.

Para eliminar la estacionalidad en este concepto, Johnson (1949) definió los términos de perfil de tormenta y perfil de acreción o normal representados en la Figura 14.

- **Perfil de tormenta:** este se forma cuando el oleaje que incide a la playa, presenta una energía muy elevada, erosionando el material que se encuentra en la parte emergida, transportándolo a la parte sumergida, situándose el material en el punto de rotura en forma de barras sumergidas. Debido a esto resulta un retroceso en la línea de costa ya que presenta una pendiente más extendida.
- **Perfil normal:** debido a un oleaje simétrico y constante la playa vuelve a la normalidad actuado sobre los depósitos sumergidos, llevándolos a la zona emergida acercando la línea de costa aumentando su pendiente. El resultado es una playa más amplia.

Gran parte de las ecuaciones disponibles consideran las tensiones del fondo, pero se diferencian en cómo consideran el fondo, ya que algunas lo hacen de manera horizontal y otras con pendiente.

Sanamura et al. (1978), utiliza un fondo horizontal en su ecuación:

Ecuación 22

$$Q_T = 2.1 * 10^6 \rho \left(\frac{u_m d_0}{\nu} \right) (u_m - u_c) d_0 T$$

Donde:

Q_T : Transporte transversal neto por unidad de ancho [m^3/s].

u_m : Velocidad máxima del fluido cerca del fondo [m/s].

d_0 : Amplitud máxima del fluido cerca del fondo [m].

T : Periodo del oleaje [s].

Watanabe et al. (1980) se utiliza para fondo con pendientes:

Ecuación 23

$$\frac{Q_T}{\omega_f d} = A(\Psi_m - \Psi_c)$$

Donde:

A: Constante experimental (1 a 5 cm³/cm/s).

Ψ_m : Parámetro de Shields.

Ψ_c : Parámetro de Shields crítico para inicio de arrastre.

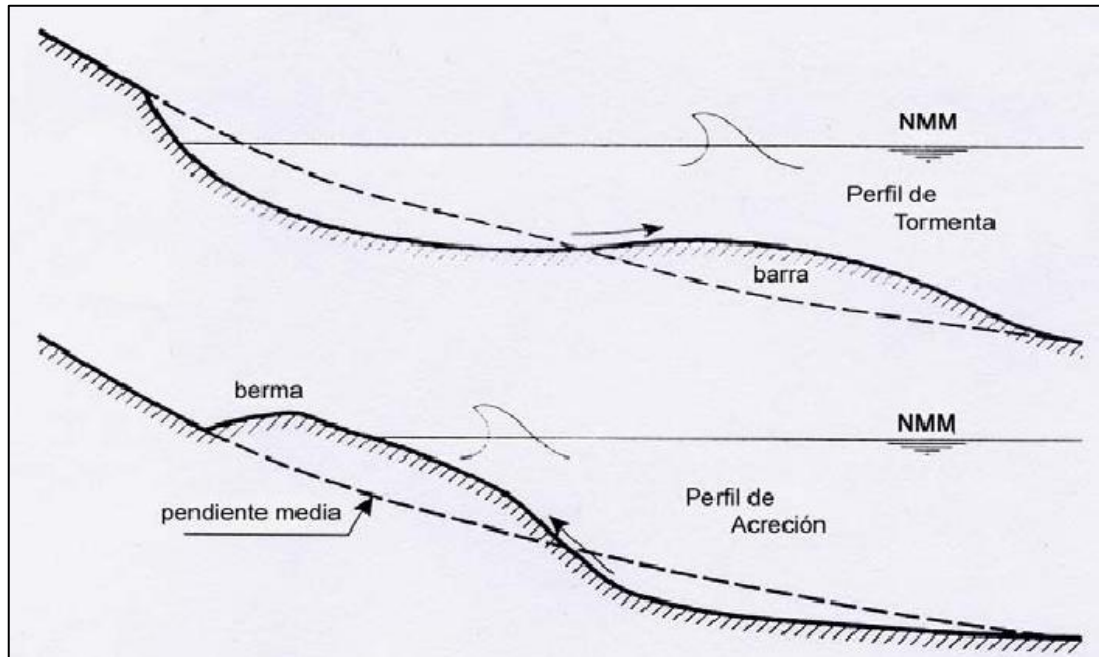


Figura 14: Perfiles transversales.

Fuente: Van Rijn, L.C. 1998

Por otro lado, existen múltiples formulaciones para la determinación de los perfiles de equilibrio, bajo variadas consideraciones tales como, playas reflejantes, con difracción, refracción, mareas y combinaciones. Una de las formulaciones más utilizadas es la desarrollada por Dean (1977):

Ecuación 24

$$h = Ax^{2/3}$$

Donde:

h : profundidad [m].

x : Distancia de la costa [m].

A: Parámetro constante relacionado a las características del sedimento.

Si bien resulta ser matemáticamente sencillo, es capaz de representar muy bien el perfil, siendo esta una de sus grandes ventajas.

4.4.3 Indicadores Estadísticos

Para analizar el comportamiento estadístico de las muestras de sedimento tomadas en la zona de estudio, se utilizarán 4 indicadores estadísticos.

Curtosis

Este coeficiente analiza el qué tan concentrados se encuentran los valores alrededor de la zona central de distribución. Se conocen 3 tipos de distribuciones según el grado de curtosis:

- **Distribución mesocúrtica:** Presenta un grado de concentración medio alrededor de los valores centrales de la variable (el mismo que presenta una distribución normal).
- **Distribución leptocúrtica:** Presenta un elevado grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable.
- **Distribución platicúrtica:** Presenta un reducido grado de concentración alrededor de los valores centrales de la variable.

La Figura 15 muestra el comportamiento de los datos de manera gráfica

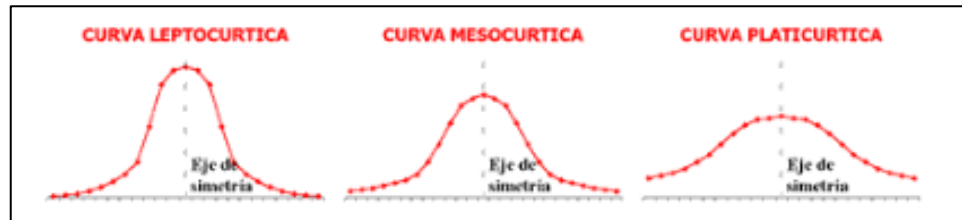


Figura 15: Curtosis

Fuente: AulaFacil (2014)

El coeficiente de curtosis se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 25

$$K = \frac{d_{95} - d_5}{2.44(d_{75} - d_{25})}$$

De los valores obtenidos se asume que:

- Entre 0.76 y 0.9 =Platicúrtica
- Entre 0.90 y 1.11 = Mesocúrtica
- Mayores a 1.11 = Leptocúrtica

Asimetría

Esta medida ayuda a determinar si los datos obtenidos se distribuyen en forma uniforme alrededor de un punto central. Como se aprecia en la Figura 16, se dice que la asimetría es positiva cuando la mayoría de los datos se encuentran por encima del valor de la media aritmética, la curva es simétrica cuando se distribuyen aproximadamente la misma cantidad de valores en ambos lados de la media y se conoce como asimetría negativa cuando la mayor cantidad de datos se aglomeran en los valores menores que la media.

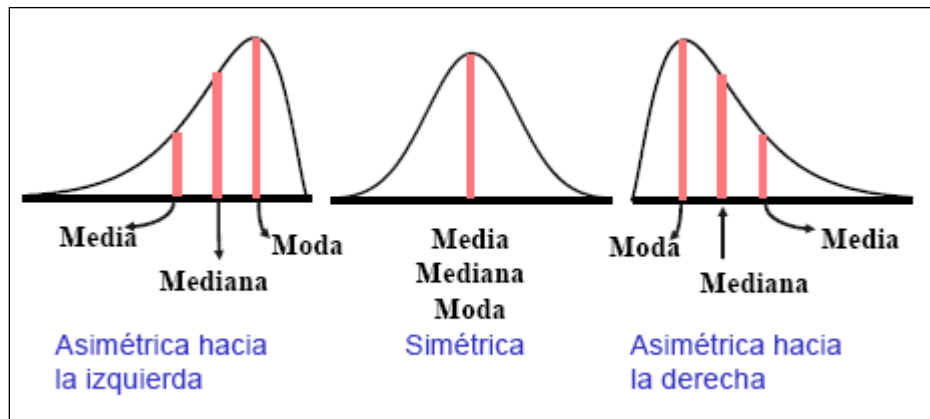


Figura 16: Asimetría

Fuente: González A. (2014)

El coeficiente se calcula como se muestra en la Ecuación 26

Ecuación 26

$$SK = \frac{d_{16} + d_{84} - 2d_{50}}{2(d_{84} - d_{16})} + \frac{d_5 + d_{95} - 2d_{50}}{2(d_{95} - d_5)}$$

Para los valores obtenidos las muestras se clasificaran como:

- Entre -1.00 y -0.30 = Altos excesos de gruesos
- Entre -0.30 y -0.10 = Moderado exceso de gruesos
- Entre -0.10 y +0.10 = Simétrica
- Entre +0.10 y +0.30 = Moderada exceso de finos
- Entre +0.30 y +1.00 = Alto exceso de finos

Desviación Estándar

Esta medida nos permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media. La desviación estándar nos da como resultado un valor numérico que representa el promedio de diferencia que hay entre los datos y la media. Para este caso se utiliza la Ecuación 27.

Ecuación 27

$$\sigma_1 = \frac{d_{84} - d_{16}}{4} + \frac{d_{95} - d_5}{6.6}$$

Con este valor se clasificarán las muestras de la siguiente forma:

- Resultados menores que 0.35 = Muy bien clasificada
- Entre 0.35 y 0.50 = Bien clasificada
- Entre 0.50 y 1.00 = Clasificación moderada
- Entre 1.00 y 2.00 = Poco clasificada
- Entre 2.00 y 4.00 = Mal clasificada
- Resultados mayores que 4.00 = Muy mal clasificada

Con estos resultados podemos clasificar las muestras según la Figura 17.

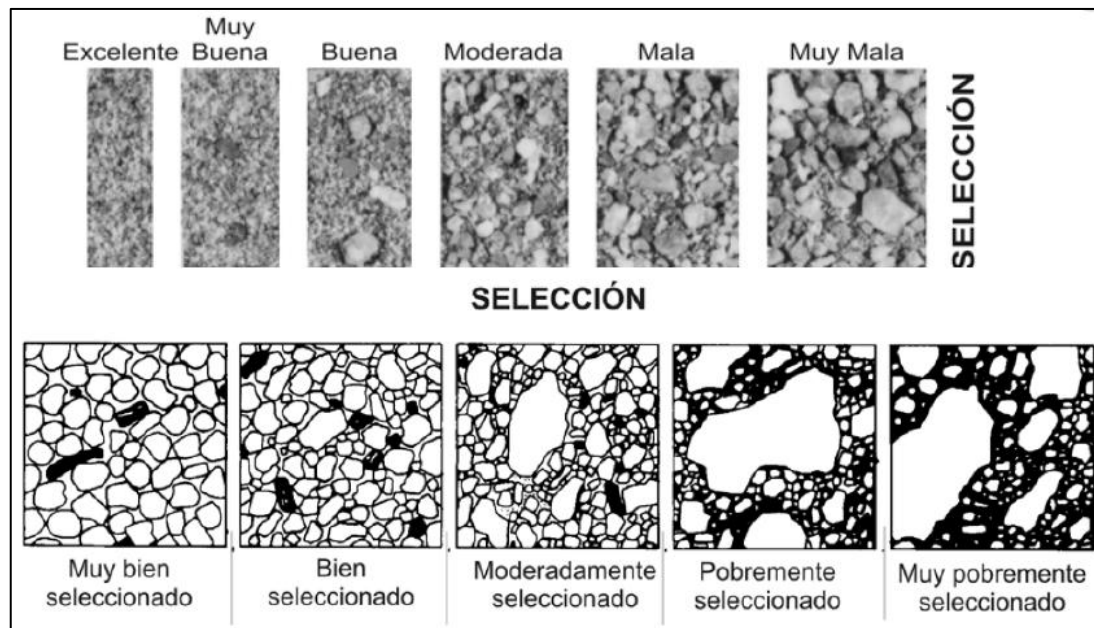


Figura 17: Clasificación de muestras

Fuente: Vergara (1981)

Tamaño Promedio

Para conocer el tamaño promedio (M) de las muestras se utilizará la Ecuación 28

Ecuación 28

$$M = \frac{d_{16} + d_{80} + d_{84}}{3}$$

Con este valor se puede determinar el tipo de sedimento promedio que posee la playa (Vergara, 1981).

4.5 EL DEPORTE DEL SURF

El surf consiste en deslizarse con una tabla alargada en una zona próxima a la rotura de una ola a lo largo del frente de onda en dirección hacia el mar, aprovechando que la resultante del movimiento de masa es en dirección hacia la playa (Walker, 1972)

El surf científico se caracteriza fundamentalmente en presentar los diferentes fenómenos, variables y condiciones físicas que se estudian para establecer si la playa es o no apta para una buena práctica de surf (José M. de la Peña Olivas, 2003).

4.5.1 Medidas de Surfeabilidad

Para evaluar una playa si cumple con las aptitudes para practicar el surf, se debe tener en cuenta los siguientes parámetros que condicionan también otras características morfológicas como la pendiente de la playa (Scarfe, 2003), los parámetros son:

Altura de ola en rotura:

Hasta ahora, todo tamaño de ola ha sido surfeable, los longboarders siguen surfeando cuando las olas solo alcanzan unos 0,15[m] de altura, mientras que los más profesionales como los surfistas remolcados pueden alcanzar grandes olas de hasta 20[m]. Generalmente se consideran olas surfeables a aquellas de entre 0,5 y 10 [m]. (Henriquez, 2004)

El tipo de rotura es otro punto fundamental para la práctica de este deporte, pues existen 4 tipos de roturas que dependen básicamente de la altura y período de la ola, y una característica de la playa, la pendiente (Cantabria, 2000):

- Spilling o Descrestamiento: en la cresta de la ola se puede observar espuma, burbujas y turbulencia, que eventualmente cubre el frente de la ola. La rotura de ésta, comienza en la cresta donde se deshace formando un pequeño chorro que resbala en el frente de la onda.

- **Plunging o Voluta:** se caracteriza por adquirir una posición vertical del frente, formando una voluta, con un chorro en la cresta que envuelve una masa de aire cayendo hacia la base de la onda, salpicando y rociando agua.
- **Collapsing o Colapso:** la parte baja del frente de la ola se peralta y voltea, ya que el punto del frente, desde donde la onda voltea o se desmorona, está adelante y por debajo de la cresta de la ola.
- **Surging u Oscilación:** el frente de la onda y su cresta se caracterizan por permanecer lisos mientras la onda se desliza por la playa generando pequeñas cantidades de espuma, burbuja y turbulencia.

La voluta es ideal para la práctica del surf, pero solo será apta para recorrerla si el surfista tiene las condiciones para realizarlo. La altura de ola y capacidad de surfearla, viene determinada en los trabajos de Hutt (2001) que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Relación clase de surfista, ángulo de descrestamiento y altura de ola.

Clase	Descripción de la clase de surfista	Angulo de descrestamiento [Grados]	Altura de ola Min/Max [Metros]
1	Principiante; todavía no puede surfear olas en su frente y simplemente se mueve siguiendo el avance del oleaje	90	0.7 / 1
2	Aprendiz; solamente puede surfear lateralmente sobre la cresta de la ola	70	0.65 / 1.5
3	Iniciado; solamente puede desarrollar su destreza surfear en la cara de la ola en plunging	60	0.6 / 2.5
4	El surfista comienza a iniciar y ejecutar ocasionalmente maniobras típicas de surf	55	0.55 / 4
5	El surfista puede ejecutar maniobras típicas consecutivamente en una ola simple	50	0.5 / 4
6	El surfista puede ejecutar maniobras típicas consecutivamente. Ejecuta maniobras avanzadas en ocasiones	40	0.45 / 4
7	Grado más alto de aficionado. Ejecuta maniobras avanzadas de surf	29	0.4 / >4
8	Profesional. Ejecuta consecutivamente maniobras avanzadas de surf	27	0.35 / >4
9	Grado más alto del nivel de profesional. Ejecuta consecutivamente maniobras avanzadas de surf	No alcanzado	0.3 / >4
10	Surfista en el futuro	No alcanzado	0.3 / >4

Fuente: Hutt (2001)

La playa a modificar, debe quedar apta para una amplia gama que en lo posible se encuentren los 10 tipos de surfistas mencionados en la Tabla 1. También se debe diseñar una pendiente con la cual el clima marítimo reinante produzca la rotura en forma de voluta, o

en algunos casos en spilling. El Gráfico 3 muestra de mejor forma la relación que existe entre el ángulo de descrestamiento y la altura de ola y que tipo de surfista puede montar dicha ola.

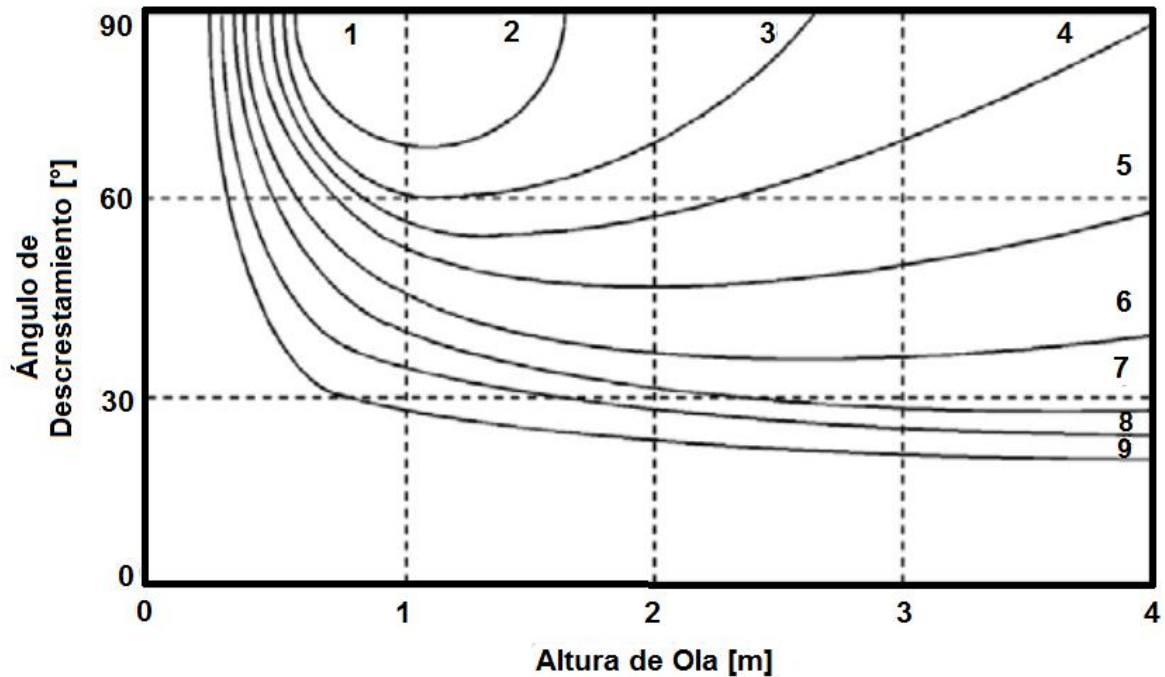


Gráfico 3: Ángulo de Descrestamiento v/s Altura de ola = Clase de surfista (números dentro del gráfico).

Fuente: Hutt (2001)

Ángulo de descrestamiento

Las olas aptas para surfear nunca rompen de una vez a lo largo de su cresta, si es así, la ola se conoce como "close-out" (90°) y no es adecuada para este deporte. Para que lo sea, es ideal que rompa gradualmente a lo largo de la cresta, esta velocidad de rompiente se conoce como velocidad de descrestamiento (peel rate V_p) como se observa en la Figura 18.



Figura 18: Superior: Ola Close-Out (Izq.) y ola con descrestamiento progresivo (der.), Inferior: Ángulo de descrestamiento

Fuente: SURFRIDER (2014)

Intensidad de rotura del oleaje

Para definir con mejor detalle las características de las olas aptas para practicar el surf, resulta necesario integrar un nuevo concepto llamado intensidad de rotura de oleaje (Mead, 2001), dado esto, se define el índice de vórtice, Figura 19 que corresponde a la relación entre la altura y la anchura del vórtice:

Ecuación 29

$$y = l/w$$

Y según la intensidad que posea, se divide en 5 grupos:

1. Medio $\rightarrow 2.8 < y < 3.1$
2. Medio-alto $\rightarrow 2.5 < y < 2.8$
3. Alto $\rightarrow 2.2 < y < 2.5$
4. Alto-muy alto $\rightarrow 1.9 < y < 2.2$
5. Extremo $\rightarrow 1.6 < y < 1.9$

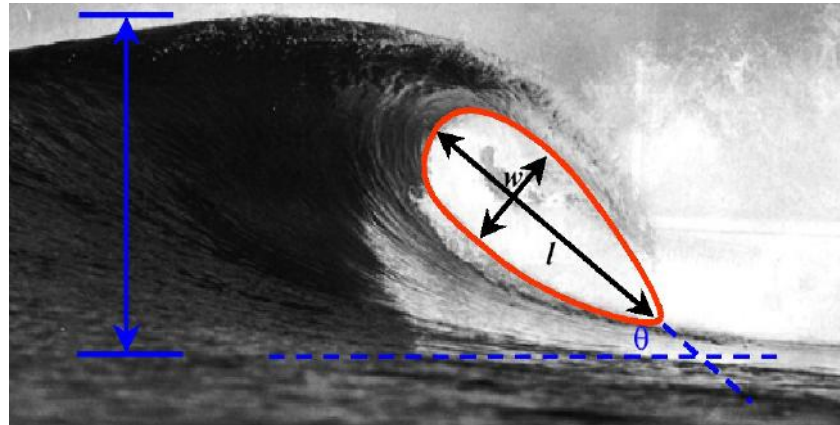


Figura 19: Índice de Vórtice

Fuente: José M. de la Peña Olivas (2003)

Longitud de la sección de la ola

Un surfista recorre la ola a medida que ésta va rompiendo. La distancia que avanza o le queda por recorrer, se le conoce como “Longitud de la sección de la ola” (Scarfe, 2003), por lo tanto esta distancia depende del ángulo de descrestamiento, que es prácticamente el ángulo del frente de la ola en rotura. Un valor óptimo de diseño debe ser entre 30° y 60°, encontrando las mayores longitudes de la sección de la ola entre los 30° y 45°.

Corrientes

Las corrientes en la zona de rompiente son de vital importancia cuando se trata de una rompiente para practicar el surf, puede darse el caso que las condiciones son ideales pero llegar a la ola se hace inalcanzable debido a las fuertes corrientes. Por lo general estos casos son poco frecuentes, pues no es ideal estar remando constantemente para alcanzar la zona ideal. La Tabla 2 muestra las típicas velocidades de remo de un surfista en aguas sin corrientes ni olas. Los 3 tipos de remo se distinguen básicamente por el tiempo de duración que puede mantener una velocidad constante de remo el surfista. La remada lenta puede ser mantenida alrededor de 10 minutos, la moderada solo puede ser mantenida por unos minutos y la más rápida es especialmente utilizada para soportar el despegue la que puede ser mantenida un corto tiempo.

Tabla 2: Velocidad de remo del surfista [m/s]

Tipo de Remo	Tabla corta (Shortboard) 6'3"	Tabla larga (Longboard) 9'3"
Lento/ crucero	0,9	1,0
Moderado	1,3	1,4
Rápido/despegue	1,8	1,9

Fuente: Elaboración Propia

Es sabido que las rip-currents o corrientes de resaca pueden destruir las buenas olas surfables (Henriquez, 2004). Estas son corrientes fuertes que se mueven mar adentro a través de la zona surf. Cuando los flujos de rip-currents atraviesan la zona de rompiente de la ola, parece tener una superficie rugosa y hace que la ola rompa de manera vacilante generando una ola no apta para el surf. Por otro lado estas corrientes también pueden ser consideradas como una ventaja para los surfistas ya que pueden ser utilizadas para salir de manera más fácil de la zona de rompiente

Hoy en día existe un alto conocimiento técnico del “surf científico”, llevado a cabo por Mead, Scarfe y Black de ASR Ltd. (Marine and Freshwater Consultancy).

4.6 OBRA DE ABRIGO SUMERGIDA: DIQUE ARRECIFE

Los Diques artificiales para el surf o en su sigla en inglés “Artificial Surfing Reef” (ASR) constituyen un tipo de obra de uso cada vez más extendido en la resolución de problemas de protección costera, en aquellos casos en los que no se requiere una total amortiguación de la energía del oleaje incidente.

Corresponden a los diques de baja cota de coronación construidos sin núcleo ni capas de filtro, por lo que consisten en una acumulación de elementos de escollera que se ajustan a un cierto perfil tipo.

Se considera como un dique rebasable debido a su baja cota de coronación, permitiendo el paso de una cantidad de energía del oleaje hacia la zona abrigada.

Otra función que cumplen este tipo de diques, es modificar el transporte litoral, ya que en los casos en que se encuentre de forma aislada y paralela a la costa, o perpendicular a la dirección del oleaje incidente, la agitación en la zona abrigada será también debida al fenómeno de la difracción del oleaje, lo que facilitará la sedimentación del transporte litoral en la zona costera ubicada detrás del dique. (Valdes, 1995)

Problemas antes los cuales se pueden utilizar un dique arrecife:

- Protección de la costa mediante la regeneración, creación o sustentación de una playa.
- Como obra de protección de canales de entrada a dársenas de pequeños y grandes puertos.
- Como elemento de protección de determinadas zonas costeras.
- Para proveer zonas de retención aptas para la instalación de un sistema de trasvase de arenas (by-passing).
- Como elemento de protección de obras costeras principales, con objeto de permitir un aligeramiento de las dimensiones de las mismas.
- Creación de áreas de calma relativa que favorezca su utilización como zonas recreativas.

Debido a las características de funcionamiento, el dique debe limitarse a ser utilizado solo en zonas con poca variación de marea.

De la energía del oleaje que alcanza una obra de este tipo, una parte es reflejada por la propia estructura, otra parte se transmite hacia la zona abrigada por rebase de la lámina de agua sobre la estructura y a través de los huecos de la misma, y el resto se disipa por rotura del oleaje sobre el dique y por fricción y turbulencia a través del mismo.

Los diques arrecifes se caracterizan por presentar un volumen de huecos importante (no en el caso de los geotextiles), por lo que se apreciará una tasa de transmisión a través de los mismos. Dado esto, a partir de la ecuación de conservación de la energía, se obtiene:

Ecuación 30

$$K_t^2 + K_r^2 + K_p^2 = 1$$

Donde

K_t = Coeficiente de transmisión = H_t / H_i

K_r =coeficiente de reflexión = H_r / H_i

K_p = coeficiente de pérdidas

H_i = altura de ola incidente

H_t = altura de ola transmitida

H_r = altura de ola reflejada

4.6.1 ASR en el mundo

El aumento de población en sectores costeros en las últimas décadas, en conjunto con las actividades económicas, ha aumentado el número de visitantes que desean disfrutar las playas en sus vacaciones y practicar deportes outdoors como el surf, la pesca, la navegación entre otras. Todo este desarrollo motivado por el creciente atractivo de las áreas costeras ha contribuido en gran medida al debilitamiento de las protecciones naturales existentes.

Las estructuras de protección costera convencionales como los espigones, diques y rompeolas emergentes son cada vez menos populares, mayormente por su impacto negativo en la playa tanto en sus comodidades como en la misma estética de esta.

Una estructura sumergida se puede diseñar de cierta forma que la nueva batimetría creada pueda mejorar las condiciones del surf, aparte de esto, contribuir a la protección de la línea de costa, y también generar un beneficio a la vida que existe en el entorno, pues las especies marítimas son atraídas a los geotextiles utilizados, tanto la flora como la fauna. Cuando una estructura como esta cumple con varias funciones, se les llama arrecifes artificiales multifuncionales o “Multifunctional artificial reef” (MFAR) en su sigla en inglés.

La experiencia pasada y los datos existentes de programas de monitoreo de los arrecifes artificiales (existentes y en construcción), no son lo suficientemente exactos en cualquier perspectiva de análisis, ya sea en:

- a. Calidad del oleaje para el surf,
- b. Funcionamiento con respecto a la protección costera,
- c. Contribución al aumento de biodiversidad,
- d. Revitalización económica a través del turismo y
- e. Participación pública en el proceso de implementación.

Sin embargo, son de gran importancia los datos que respectan a las dimensiones, volúmenes y costos de la construcción, los que se relacionan directamente con el funcionamiento final de la estructura.

Existe un creciente interés por utilizar geotextiles en vez de materiales convencionales para la protección de la costa. En particular, el arrecife multifuncional resulta más interesante en términos económicos, debido a que los geotextiles contenedores de la arena resultan ser más económicos por unidad de volumen que las estructuras de talud. Por otro lado, el surf como resultado de esto atrae turismo, lo que es beneficioso para la economía local.

La demanda de estas estructuras se registra en El Segundo, California con una larga tormenta en el invierno de 1982, que causo una gran erosión en la playa dejando descubiertas las tuberías del terminal marino de Chevron, quien propuso como solución instalar un espigón de rocas 270 [m]. Los grupos de Surf del sector se opusieron a la solución ya que notaron que era muy probable que el proyecto atentara con la pérdida de uno de los lugares más populares de práctica del surf.

Chevron obtuvo el permiso de construcción del espigón, haciéndose responsable de la calidad de la rompiente del lugar. Con el paso de los años, a fines de los noventa, se corroboró la hipótesis que presentaron los surfistas del sector, por lo que Chevron aceptó la construcción de un dique artificial para el surf, llevándose a cabo entre los años 2000-2001. El dique obtuvo el nombre de “Pratte’s Reef” (ver Figura 20), el cual finalmente no funcionó como se esperaba. Una de las principales razones fue que el arrecife se estaba nivelando con el fondo marino por la acresión. Antes que esto, el arrecife no pareció funcionar, probablemente por las deficiencias del diseño que poseía. Se utilizó un modelo lineal para diseñar el arrecife, sabiéndose que no se puede subestimar la altura de ola en su punto de rompiente. La malla utilizada fue relativamente gruesa y la determinación de los parámetros de surfabilidad fueron hechos primitivamente.

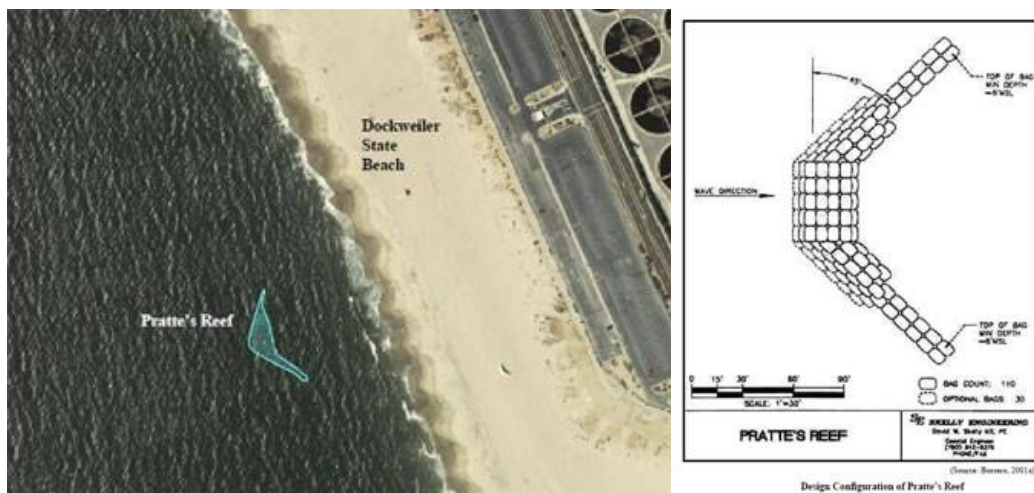


Figura 20: “Pratte’s reef” California, EEUU. (32° 55’ N – 118° 26’ W).

Fuente: Dietrich (2014)

Por otro lado, en 1988, el Gobierno de Australia del Oeste, estudió la factibilidad de la construcción de un arrecife artificial para el surf en las cercanías de Perth. El propósito era descongestionar las playas con buenas rompientes llenas de surfistas y eliminar la competencia entre diferentes usuarios de las playas. El arrecife fue diseñado en laboratorio por expertos, llevándose a cabo su construcción en 1999, donde las opiniones de su funcionamiento difieren, diciéndose que sólo se desempeña de mejor manera en invierno con oleaje swell, que en la época de verano. Este arrecife tiene un largo de 140 [m] y presenta una profundidad de 2 ½ [m] a 1 [m], donde anteriormente habían 6[m]. Ver Figura 21

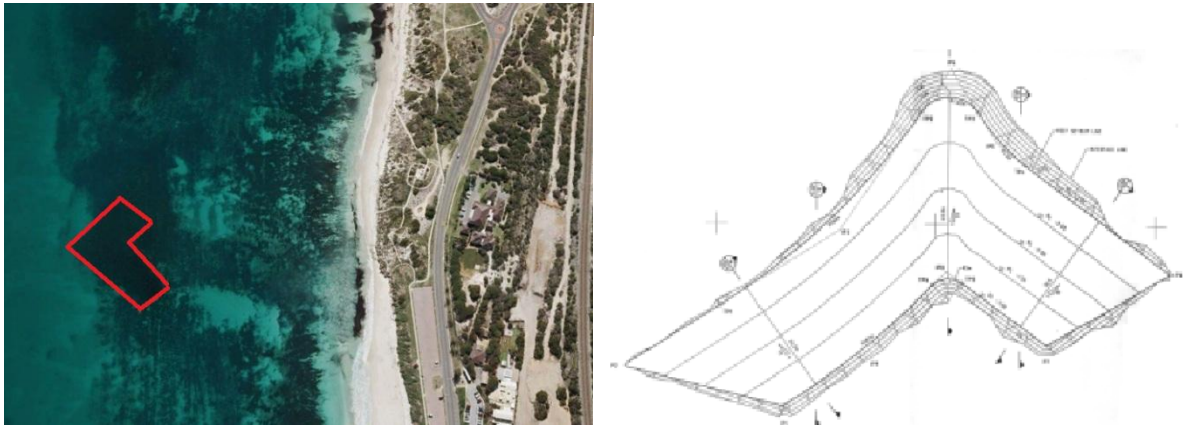


Figura 21: "Cable Station Artificial Surfing Reef", Australia ($32^{\circ} 00'S - 115^{\circ} 45' E$).

Fuente: Pattiaratchi (2003)

Al otro lado de Australia, el Consejo de la ciudad de Gold Coast requirió de un arrecife artificial para mejorar las condiciones del surf, bloquear parcialmente el transporte de sedimento a lo largo de la costa y ampliar la berma de la playa que fue considerablemente erosionada en una tormenta. La firma consultora ASR Ltda. se adjudicó el diseño de la obra, utilizando modelos numéricos y físicos a escala para analizar la respuesta la línea de costa. Ver Figura 22

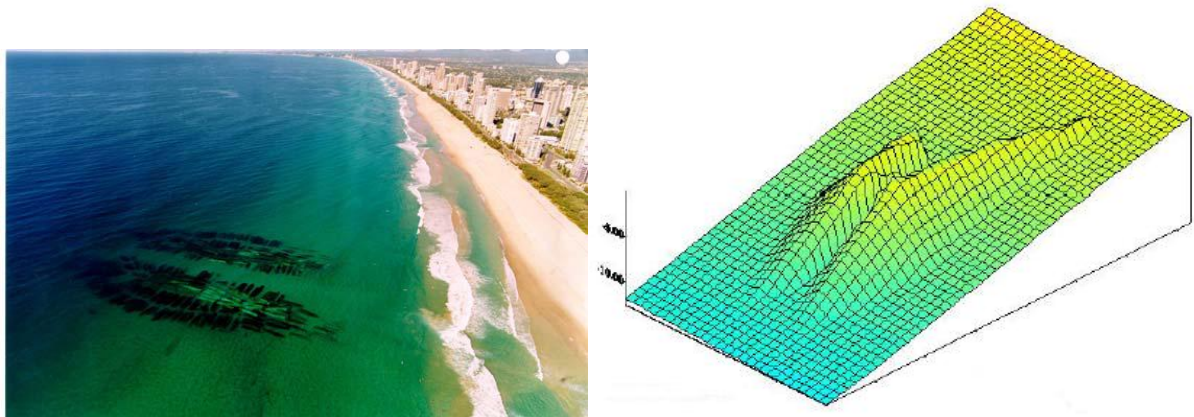


Figura 22: Narrowneck Reef, Australia ($27^{\circ}59'S - 153^{\circ}26' E$).

Fuente: ASR (2008)

Narrowneck se caracteriza hoy en día por proteger de manera eficiente la costa, como se muestra en la Figura 23, no presenta mejoras en el Surf pero ha atraído bastante vida marítima. El dique fue ubicado a unos 400 [m] de la costa, tiene unos 200[m] en la parte más ancha y va desde los 2,0 [m] a 10,5 [m] de profundidad.



Figura 23: Mejora de Línea de costa, Narrowneck, Australia.

Fuente: Mr L.A. Jackson (2003)

Otro caso de implementación de arrecife artificial se da en Boscombe, Reino Unido, donde se planeaba doblar el número de días para la práctica del surf, y como consecuencia el número de visitantes a la ciudad, ya que se contaban con sólo 77 días de condiciones ideales para la buena práctica. Su factibilidad se comenzó a estudiar en 1999, comenzando su construcción en el 2008 después de varios inconvenientes, terminando un año y medio después, para luego ser cerrado en marzo del 2011 por razones de seguridad, reparándose posteriormente. El arrecife se ubicó a unos 225[m] de la playa, alcanzando un volumen de 13.000[m³], según informes generales de surfistas, su funcionamiento no fue como lo esperado, en cuanto la empresa a cargo de la obra, ASR.Ltda. se defiende afirmando con que se cumplen la mayor parte de los criterios de diseño. A pesar de la publicidad negativa que recibió el arrecife de Boscombe, existe un grupo de practicantes de bodyboard del lugar que utilizan regularmente el arrecife, antes y después de su cierre.



Figura 24: “Boscombe Surf Reef”, Inglaterra (50°43’N - 1°50’W)

Fuente: Google Earth (izq.) BNPS (2014) (der.)

En Nueva Zelanda, la ciudad de Mount Maunganui, implementó un arrecife específicamente construido para el Surf, de unos 6.500[m³] y se ubica a unos 250[m] de la línea de costa y a unos 0,4 [m] bajo la marea más baja. “ASR. Ltda” implementó modelos numéricos y físicos para la compresión y cuantificación del oleaje surfable. La reputación de la playa, como

meca del surf ha incrementado, produciendo olas de tubo más rápidas que rompen hacia la derecha y a la izquierda, aptos para surfistas competentes y con experiencia. (Tourism, 2013)

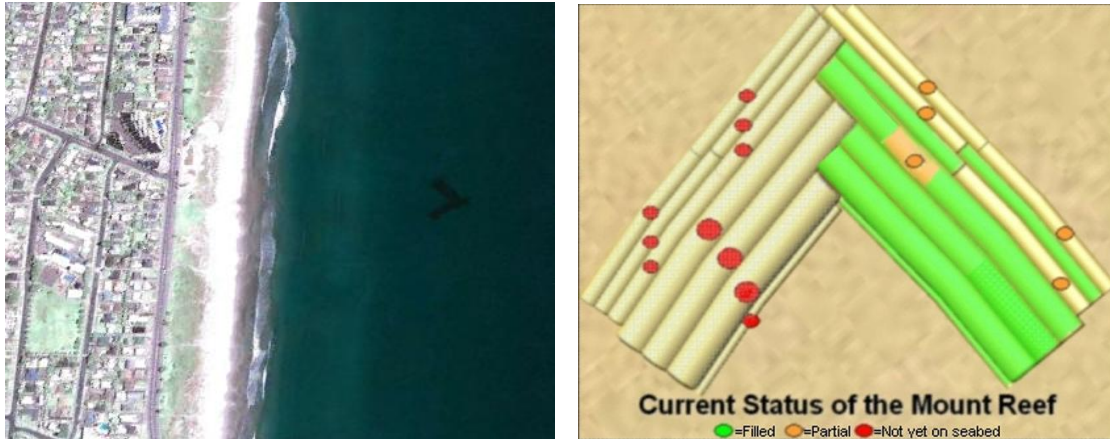


Figura 25: “Mount Maunganui Reef”, Nueva Zelanda (37°38’S – 176°12’E)

Fuente: Google Earth (izq.), Surf2Surf (2014) (der.)

Kovalam ha sido una de las ciudades turísticas más populares del sur de India, y su línea de costa ha sufrido severas erosiones durante las temporadas de monzones lo que ha llevado a grandes pérdidas de la infraestructura del borde costero. Después de desarrollar extensos estudios de modelos numéricos y físicos y pruebas de calibración de la obra, “ASR Ltda.” nuevamente completó la construcción de un nuevo dique arrecife en el 2010. Esta estructura fue especialmente diseñada para hacer romper las poderosas olas del sector aguas afueras, así minimizando los efectos erosivos que generaban. También fue posicionado para direccionar las corrientes que son parcialmente responsables de la reducción del tamaño de la berma de la playa. La estructura tiene 110[m] de largo y 30[m] de ancho, ubicándose a unos 100[m] de la costa, siendo una obra de unos 4000[m³]. Reportes locales indican que el arrecife ha demostrado una buena respuesta, creando una playa más ancha y estable. También ha mejorado el turismo del sector atrayendo organizaciones mundiales dedicadas al surf.



Figura 26:” Kovalam Reef” India (8°23’N – 76°58’E)

Fuente: Jensen (2010)

La Tabla 3 muestra un resumen de las características de los ASR construidos. Los costos de construcción de cada obra se actualizaron al año 2014 mediante una calculadora de inflación desde el año en que se llevó a cabo la construcción de la obra hasta el 2014. (LLC, 2014)

Tabla 3: Comparación de características de ASRs en el mundo.

Arrecife	Cables	Narrowneck	Pratte's	Mt. Maunganui	Boscombe	Kovalan
Ubicación	Cable Beach, Perth, Australia	Narrowneck, Australia	El segundo, California, EEUU	Mount Maunganui, Nueva Zelanda	Boscombe, Inglaterra	Kovalan, India
Fecha Inicio	feb-99	may-99	sep-00	nov-05	ago-08	dic-09
Fecha Terminó	dic-99	mar-00	abr-01	mar-06	nov-09	feb-10
Material de construcción	Roca de Granito	Geotextil relleno de arena	Geotextil relleno de arena	Geotextil relleno de arena	Geotextil relleno de arena	Geotextil relleno de arena
Efectividad para el Surf	Efectivo	Efectividad Regular	Sin Efectividad	Efectivo	Efectividad Regular	Efectivo
Efectividad como protección costera	No aplica	Muy Efectivo	Nulo(se removió el 2008)	Efectividad Regular (no es su 1ra función)	No aplica	Muy Efectivo
Crecimiento biológico	No se sabe	Muy Efectivo	Alta Efectividad mientras existió	Muy Efectivo	Muy Efectivo	Muy Efectivo
Volumen [m³]	5.500	70.000	1.600	6.500	13.000	4.000
Costo Actual (U\$) (2014)	\$1.897.631	\$3.212.859	\$535.839	\$1.411.362	\$5.225.220	\$1.745.262

Fuente: Elaboración Propia

4.6.2 Geometría más apropiada para un dique arrecife multifuncional

Cualquier arrecife artificial que sea construido tanto para proteger la costa como para crear condiciones para el surf necesitará varias opciones de diseños para definir la geometría del arrecife. Debe señalarse que una vez determinada la geometría para la hidrodinámica del dique, es necesario hacer un completo estudio morfodinámico (físico y/o numérico) para investigar la capacidad del dique para proteger la costa.

La elección de la forma de la geometría se relaciona principalmente con el ángulo de descrestamiento o “peel angle”, el cual es el ángulo que se forma entre la cresta de la ola y la línea de rompiente como se muestra en la Figura 27. También se puede apreciar que α es igual que el ángulo de la onda β , que se forma entre la normal del arrecife y el rayo de

oleaje, si la línea de rompiente es paralela a la batimetría, entonces θ se conoce como ángulo de arrecife (Reef Angle).

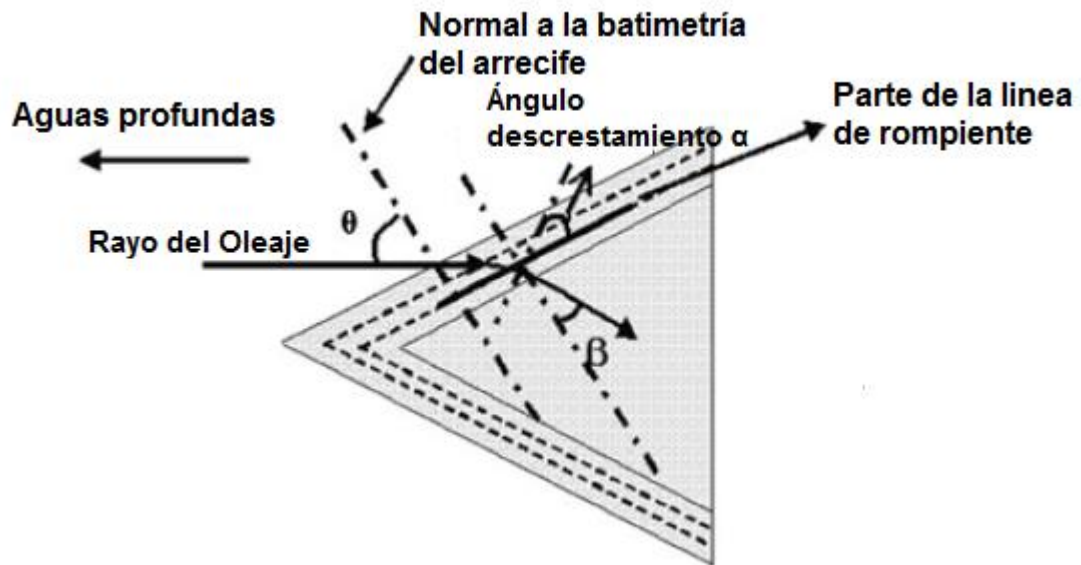


Figura 27: Ángulo Descrestamiento (V_p : velocidad de descrestamiento; V_s : Velocidad de línea descendente; C: Celeridad de onda)

Fuente: José Antunes do Carmo (2011), Google Earth

El ángulo de descrestamiento necesita ser suficientemente grande para que una ola sea surfeable.

Formas de Arrecifes

Todas las formas de arrecifes son ubicadas en un plano de la playa en donde la dirección de la ola incidente es normal a los veriles de la playa. Para mantener las formas relativamente simples y así minimizar el número de estas, se aplicaron restricciones a las formas de los arrecifes. En primer lugar los veriles del arrecife pueden ser rectos o curvos o ambos y en segundo lugar la pendiente normal a los veriles del arrecife debe ser constante e igual en todo el dique.

Como ya se ha mencionado, resulta evidente que los arrecifes artificiales necesitan al menos de dos características para producir olas con ángulos de descrestamiento surfeables. Primero, la normal del arrecife con la dirección de incidencia del oleaje debe formar un cierto ángulo, conocido como ángulo de arrecife (θ). Y segundo, el arrecife debe partir en una profundidad relativamente baja. La forma de la Figura 28 a) es una de las más simples que cumple con estas características; este presenta una forma triangular en el plano con líneas rectas a los lados y curvas en la punta. Las variables de esta forma son la pendiente 1:n normal a los veriles y el ángulo de arrecife.

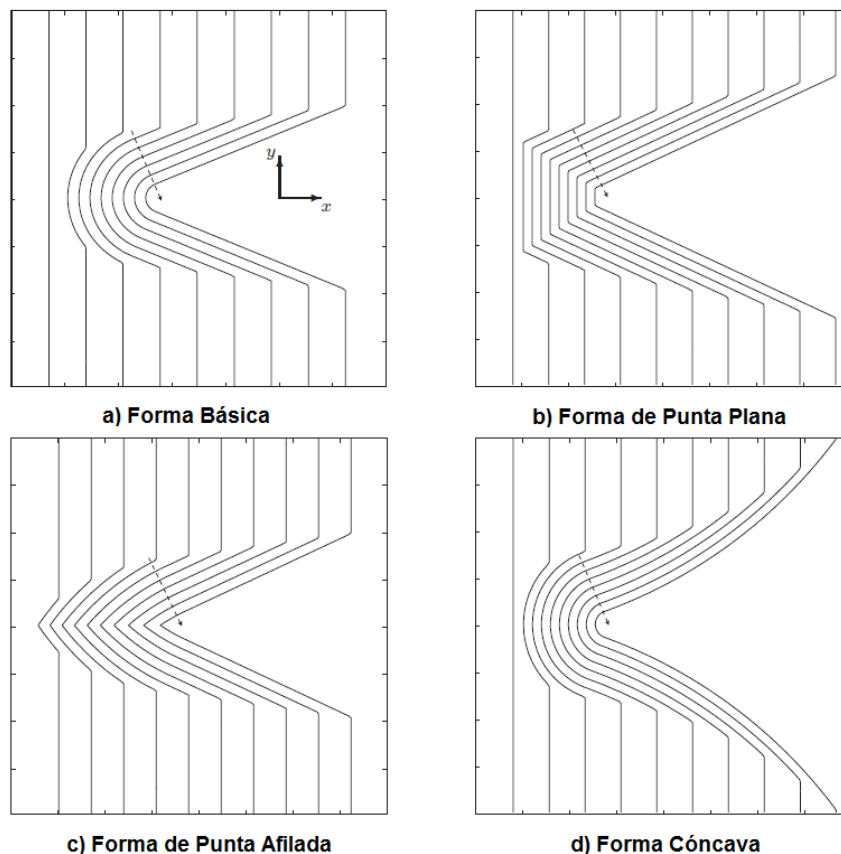


Figura 28: Formas de arrecifes artificiales.

Fuente: Henríquez (2004)

Se ha determinado que las olas que pasan sobre la punta de la forma básica, encuentran un mayor gradiente de pendiente que en los lados, lo que resulta en una ola rompiente de mayor intensidad en la punta, lo que generalmente no es muy deseado por los surfistas, por lo que es más práctico tener olas rompiendo de menor intensidad en la punta permitiendo así, un mejor despegue y una onda rompiendo con intensidad relativa durante el viaje; para lograr esto, se debe disminuir la inclinación (pendiente) de la punta del arrecife. Realizando esta modificación, resulta la forma b) de la Figura 28 con punta plana, en donde se agrega otra pendiente de la punta del arrecife, siendo una nueva variable. Otra opción es mantener el ángulo del arrecife lo suficientemente largo para que las olas se encuentren con una menor gradiente de pendiente, lo que resulta la forma c) de la Figura 28, conocido como punta afilada, la que es controlada por el radio del contorno de la punta del arrecife.

Otra forma de variación se presenta cuando los contornos rectos del arrecife son cambiando por otros más curvos, lo que se conoce como forma Cóncava (b Figura 28). Como se determinó anteriormente, cuando existe un ángulo de arrecife constante (contornos rectos) el ángulo de descrestamiento aumentará hacia la costa, la idea detrás de forma cóncava es mantener este efecto y mantener este ángulo más o menos constante. Esto se logra mediante una disminución gradual del ángulo de arrecife hacia la costa. (S.T Mead, 1998).

La forma está determinada por el radio del contorno de los lados del arrecife.

Otra variación está dada por la profundidad de inicio del pie del arrecife, pues a mayor profundidad, mayor será el trayecto que recorrerá el surfista. La profundidad óptima, es la que cumple los requerimientos de los surfistas sin aumentar tanto los costos del diseño, ya que a mayor profundidad, más relleno, lo que se traduce en un aumento del costo.

La elección del diseño inicial de la geometría, puede ser en forma de delta para así obtener dos puntos de despegue, hacia la izquierda y la derecha. La estructura de delta que se diseña para crear olas surfeables, puede ser ubicada en el fondo del mar o en una plataforma (Figura 29). Esta última, es en teoría, buena para el aspecto de protección costera del dique, ya que hace que las olas rompan sobre esta en toda su anchura. Se ha encontrado que la plataforma presenta una influencia positiva en los parámetros de un surfista, como son el ángulo de descrestamiento, el tipo de rompiente y la altura de ola en rompiente (H_b). Sin embargo, sino se utiliza la plataforma, es mejor para el ángulo de descrestamiento si el arrecife es menos alto, es decir, con una altura cerca del mínimo.

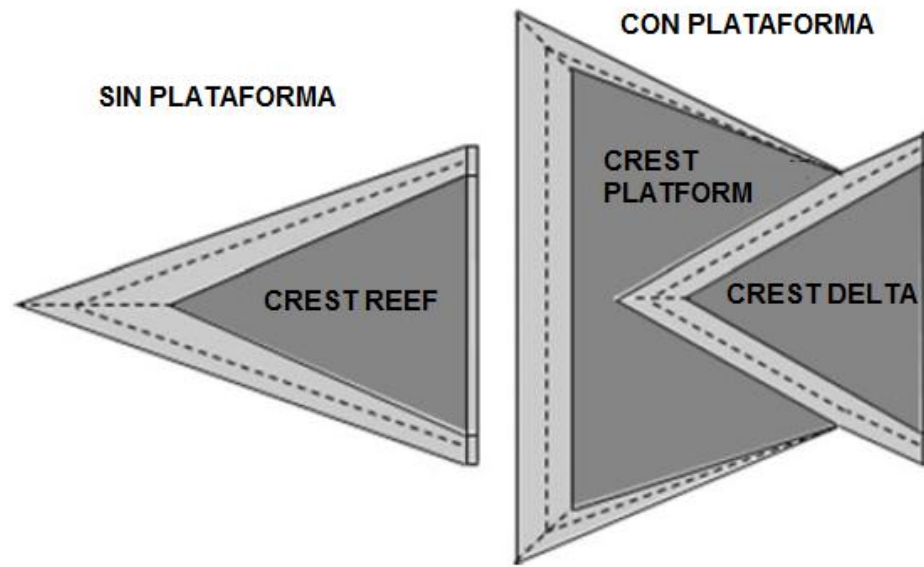


Figura 29: Geometría del arrecife con y sin plataforma

Fuente: José Antunes do Carmo (2011)

En relación a las dimensiones del arrecife, para determinar el largo y alto exacto de este, y así obtener una rompiente apropiada en función de los parámetros de las ondas, se deben realizar simulaciones numéricas. El largo va a depender de que tanta línea de costa se quiera proteger. (José Antunes do Carmo, 2011)

4.6.3 Metodología de diseño de arrecifes artificiales para condicionar la rotura del oleaje

Si bien existe amplia información sobre arrecifes artificiales que se encuentran hoy en día en funcionamiento y estudios orientados a entender mejor la interacción entre el oleaje y estas estructuras, no existe mucho material que condense esta información para su uso práctico en el diseño. Dado esto, el objetivo principal de la Tesis desarrollada por Alday (2014) es integrar la información disponible para generar una metodología de diseño de arrecifes artificiales, basándose en el uso de modelación numérica para la estimación de los parámetros de caracterización de la rotura, como el ángulo de descrestamiento, la altura de ola en rotura y el tipo de rotura.

La metodología se basa en definir en un principio variables de forma básica al arrecife, utilizando información del lugar seleccionado (batimetría, oleaje local), criterios de uso del arrecife (nivel de dificultad para el deportista) y recomendaciones de documentos consultados.

Una vez definido el diseño de la estructura, se realiza un análisis de operación del arrecife, con el fin de identificar los parámetros de caracterización de la rotura obtenidos, para todos los estados de mar considerados en el estudio de oleaje, asignando las frecuencias de

ocurrencia de dichos estados de mar a las características del oleaje rompiente. Esta información permite evaluar de forma preliminar el desempeño de la estructura diseñada.

Fracción de oleaje en rotura

En condiciones de oleaje irregular, donde existe gran variedad de alturas y periodos en el espectro de oleaje, la rotura de cada una de estas componentes comienza a diferentes profundidades. En un perfil de costa con pendiente uniforme, es posible asumir que el oleaje continuará rompiendo una vez que lo ha comenzado a hacer. Dado esto, en un cierto punto en el avance del oleaje hacia la costa, existirá un determinado porcentaje de las componentes de una serie de ondas (las originalmente más altas) que estarán rompiendo. De acuerdo a los supuestos de Battjes y Janssen (1978) se asume que las alturas de las ondas que no han entrado en rotura siguen una distribución Rayleigh de la siguiente forma:

Ecuación 31

$$P(H \leq H_0) = 1 - e^{-\frac{H_0^2}{2\hat{H}^2}}$$

Donde \hat{H} es parámetro de la distribución. Se asume que a medida que las ondas se propagan a la costa, comienzan a romper a medida que alcanzan una altura máxima H_m , la que depende de la profundidad local. Además, se asume que al romper mantienen una altura H_m asociada a cada profundidad por la que se propagan. Así la fracción de oleaje en rotura Q_b está dada por la siguiente expresión:

Ecuación 32

$$Q_b = P(H > H_m) = e^{-\frac{H_m^2}{2\hat{H}^2}}$$

Sobre la base de un valor definido de Q_b es posible estimar H_m a una profundidad h dada utilizando la relación $H_m = \gamma h$. El estudio define un valor de $\gamma = 0.42$. Luego, es posible relacionar Q_b con H_m y H_{rms} como se representa en la siguiente ecuación:

Ecuación 33

$$\frac{1 - Q_b}{\ln(Q_b)} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right)^2$$

Es posible relacionar la altura significativa H_s (en términos espectrales) con H_{rms} de la siguiente manera, si:

$$m_0 = \iint E(w, \vartheta) dw d\vartheta^2$$

Y

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0}$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0}$$

Se obtiene finalmente que:

Ecuación 34

$$H_s = \sqrt{2}H_{rms}$$

Finalmente, es posible asociar un cierto valor de la fracción de oleaje en rotura a un valor de la altura significativa (espectral) y obtener al mismo tiempo la profundidad a la cual se estima dicha altura. Se utilizará el parámetro Q_b como un indicador de la rotura para cada uno de los estados de mar analizados, obteniéndose un valor H_s que se asume igual a la altura de ola en rotura H_b .

4.7 RESPUESTA DE LINEA DE COSTA MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE UN DIQUE SUMERGIDO

Como ya ha sido mencionado, las estructuras sumergidas tienen el potencial de mejorar la diversidad y uso de las zonas costeras, actuando como protección, potenciando la vida marina, favoreciendo deportes como el surf, el bucear y nadar de forma más protegida.

Sin embargo, estas estructuras presentan un efecto que no muchas veces es estudiado y que a largo plazo puede modificar las condiciones del sector, quedando inutilizado para lo que en un principio fue el fin de la estructura. En lugares donde existe un alto transporte de sedimento a lo largo de la costa, una excesiva protección puede llevar a la formación de un tómbolo como se observa la Figura 30 donde la interrupción del sedimento puede generar en algunos casos erosiones en los puntos desprotegidos.



Figura 30: Tómbolo

Fuente: Project (2014)

También existen estructuras que crean salientes sin ser deseadas como en playas abiertas, donde crece accidentalmente detrás de la estructura como se muestra en la Figura 31

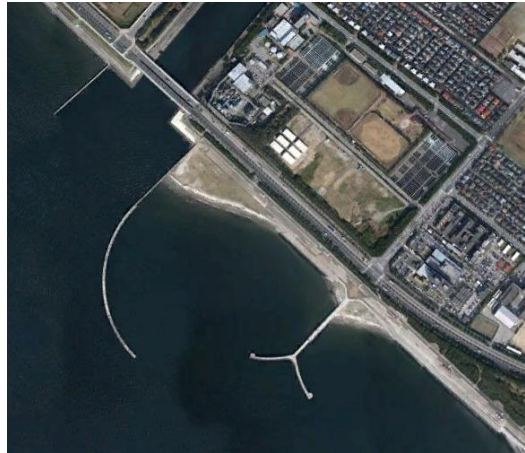


Figura 31: Saliente desarrollada detrás de estructura en el puerto de Japón

Fuente: Google Earth

Basado en el ancho de la estructura implementada, y en la distancia a la que se ubica desde la costa se desarrolla una relación empírica para predecir el tamaño de la saliente. Esta metodología fue desarrollada por Kerry P. Black y Connon J. Andrews. (P, Black, & Andrews, 2001). La Figura 32 muestra los parámetros utilizados para determinar la saliente donde:

- B:** Ancho del Dique (Reef)
- S:** Distancia de la costa
- Y_{off} :** Amplitud de la Saliente
- X_{off} :** Distancia entre el Dique y la Saliente
- D_{tot} :** Largo de la Saliente

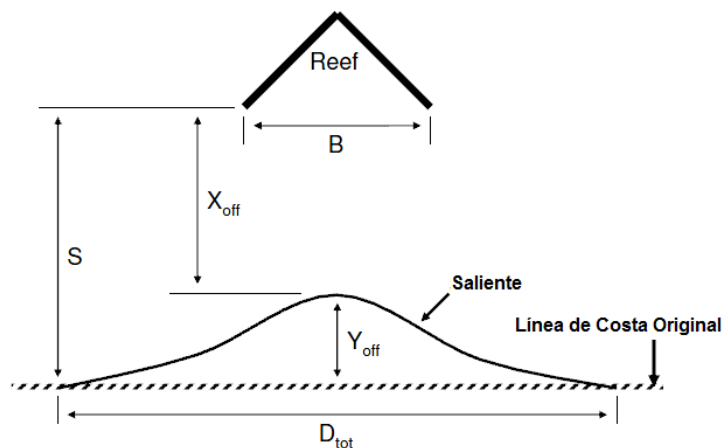


Figura 32: Parámetros para el cálculo de Saliente

Fuente: Hearin (2009)

Hasta la fecha, no se han realizado estudios que explique de forma sistemática la formación de salientes naturales y tómbolos. Sin embargo, en los lugares donde se han utilizado estructuras sumergidas, se ha investigado el tipo de relación que se genera entre las dimensiones del dique y la progradación de la línea de costa. Dado esto se han propuesto diferentes relaciones como se muestra en la Tabla 4:

Tabla 4: Relaciones y condiciones de la creación de saliente o tómbolos

Relación	Condición	Autor
$B/S < 0,5$	Sin depósitos	(Nir, 1982)
$B/S = 0,5 - 1,0$	Formación de Saliente	(SPM, 1984)
$B/S > 0,67$	Formación de Tómbolo	(Gourlay, 1981)
$B/S > 1,0$	Formación de Tómbolo	(SPM, 1984)

Fuente: Elaboración Propia

Se ha observado que tanto salientes como tómbolos son creados entre el rango de 0,6 y 1,0, lo que indica que la línea de costa reacciona de distintas formas según las condiciones específicas del lugar.

5 DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

5.1 BATIMETRÍA

La batimetría corresponde a la medición de la profundidad del cuerpo de agua, ya sea de lagos u océanos. También se puede asociar a la topografía bajo el agua. Las primeras técnicas para realizar esta medición y que hoy en día se sigue usando para casos puntuales, es la utilización de una cuerda o cable con marcas espaciadas y un peso en su extremo, conocido como escandallo. Se caracteriza por ser un sistema tedioso y con frecuencia inexacto ya que solo mide un punto a la vez y puede ser desviado por corrientes o movimientos de la embarcación.

Hoy en día se hacen mediciones con GPS diferenciales para obtener una posición más exacta, y sondas mono o multihaz para determinar la profundidad, datos que posteriormente se procesan en un ordenador.

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada dispone de cartas batimétricas que representa la forma del fondo mediante puntos e isobatas (línea de igual profundidad). Estas cartas solo cuentan con datos en aguas profundas, debido a la dificultad de hacer batimetría en aguas poco profundas, ya sea por el tamaño de la embarcación y el peligro que corre al estar cerca de la rompiente.

Las cartas utilizadas para la generación de mallas batimétricas en el presente informe son:

- 4000 Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso
- 5000 Bahía Valparaíso a Golfo Arauco
- 4320 Bahía Quintero a Bahía Valparaíso

Para la realización de la batimetría en aguas poco profundas se utilizó un sistema de levantamiento hidrográfico de bajo costo mediante un kayak. Sistema extremadamente flexible ya que puede ser fácilmente utilizado en las cercanías de la costa, donde se prohíbe la utilización de embarcaciones motorizadas. El costo y complejidad que conlleva una batimetría se reduce al mínimo mediante el uso de un Sistema de GPS Map 421s, una antena externa GA 30 y un Transductor de doble frecuencia de 50/200 [khz].

Este sistema se caracteriza por ser de fácil construcción, no produce ningún tipo de contaminación al medio ambiente y alcanza lugares de difícil acceso para embarcaciones motorizadas. La Figura 33 muestra el ensamblaje del kayak con los aparatos.

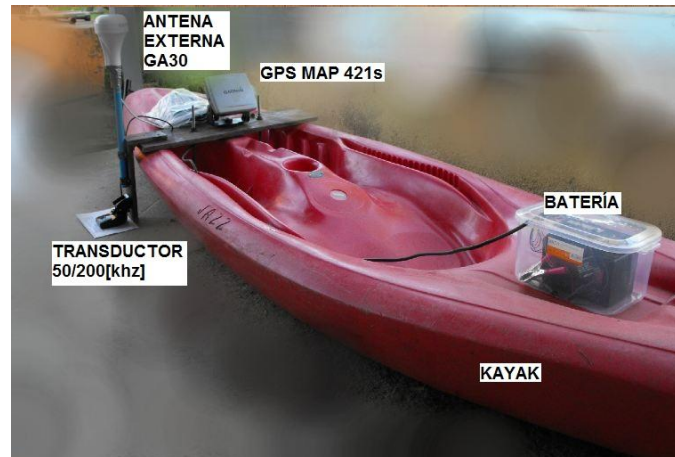


Figura 33: Kayak y su equipamiento para medición.

Fuente: Elaboración Propia

En primera instancia el equipo se probó en una piscina como se muestra en la Figura 34, en la cual se conocía la profundidad, y el equipo arrojó el mismo valor. En este caso la piscina tenía una profundidad de 1.7 [m] y el equipo midió 1.7 [m].



Figura 34: Prueba de funcionamiento de equipo monohaz en piscina con profundidad conocida.

Fuente: Elaboración Propia

A la izquierda de la Figura 36 se muestra la situación de la batimetría actual de la playa de Reñaca, en donde se puede apreciar que los puntos de medición más cercanos a la costa se encuentran a aproximadamente 1 kilómetro. Razón por la cual se llevó a cabo la exploración del sector, para así contar con información más detallada del lugar a estudiar, debido a que interpolar sólo con la batimetría del SHOA, se pierden puntos importantes que finalmente alteran los resultados finales.

La toma de datos se llevó a cabo el día 26 de Junio del 2013, zarpando de la caleta de Montemar (32°57.4 S – 71°32.98 W) con Autorización de la Universidad de Valparaíso y de la Autoridad Marítima, a las 9:45 am con marea llanante de 0.954[m], haciendo un recorrido de aproximadamente 3 horas. Las condiciones existentes en el sector al momento de la toma de datos se presentan en la Tabla 5 extraída del sitio web WindGuru.

Tabla 5: Pronóstico WindGuru día de campaña.

GFS 50 km	Olas (m)								Dirección olas								Período olas (seg)							
	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h	00h	03h	06h	09h	12h	15h	18h	21h
26.06.2013	2	1.9	1.9	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	↗	14	14	15	15	15	15	15	15

Fuente: (WindGuru, 2013)

La Figura 35: Toma de Datos Figura 35 muestra la campaña realizada.



Figura 35: Toma de Datos en sector.

Fuente: Elaboración Propia

A la derecha de la Figura 36 se puede observar el trayecto que se realizó, en donde se tomaron alrededor de 300 puntos.

Para el propósito del estudio, el SHOA considera como “Batimetría Exploratoria” el levantamiento de datos, ya que el fin de esta, es conocer las características de la configuración del fondo y así estudiar la factibilidad de ejecutar una obra marítima, los datos obtenidos no pueden ser utilizados para navegación.

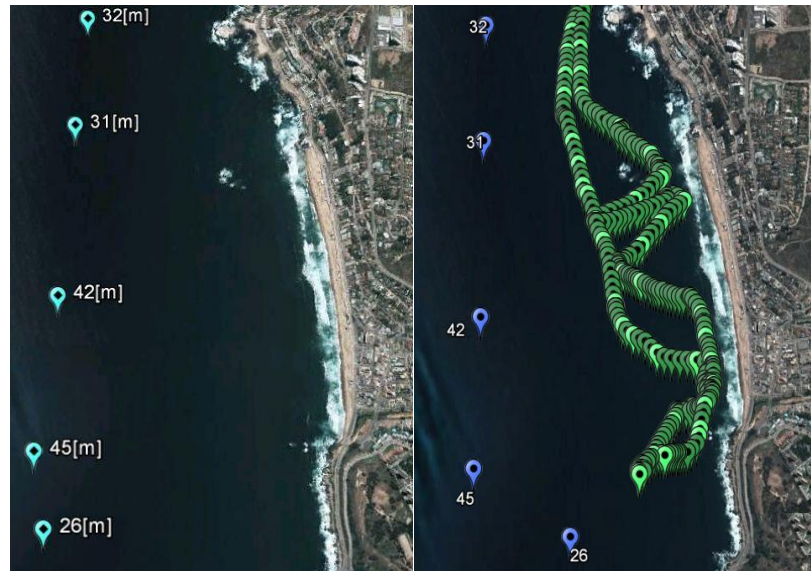


Figura 36: Izquierda: Batimetría SHOA. Derecha: Levantamiento de datos con Kayak

Fuente: Google Earth

Luego, los datos obtenidos junto con los ya existentes, son interpolados por el método de Kriging, el cual hace la relación de que los puntos próximos en el espacio, tienden a tener valores más parecidos que los que se encuentran más lejanos. La interpolación se realiza en el software Surfer y como se puede apreciar en la comparación de la Figura 37, ambas grillas están hechas de 5x5 [m] de resolución, la superior se hizo sólo con los datos obtenidos de las cartas del SHOA, y en la inferior se aprecia con mayor detalle las rocas y pendiente del fondo con los datos obtenidos en la expedición.

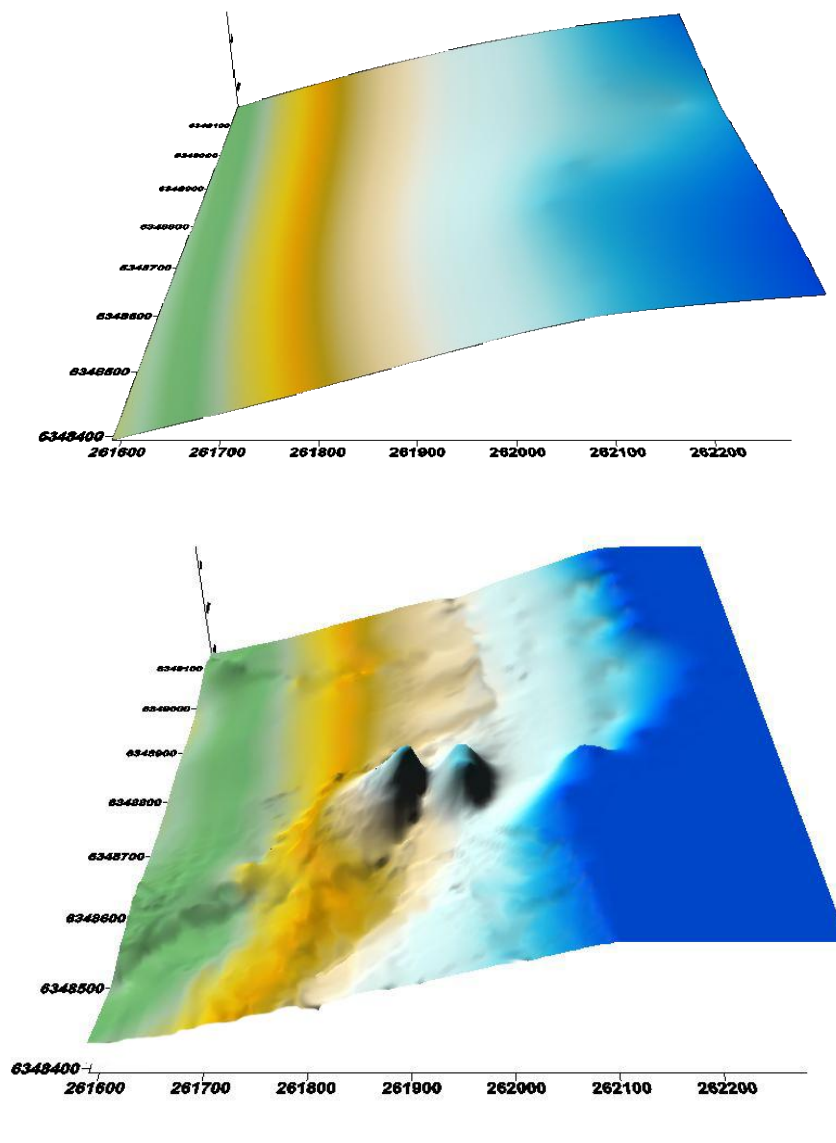


Figura 37: Interpolación en Surfer

Esta información es utilizada para la realización de 3 mallas batimétricas de diferente resolución como se muestra a continuación, la primera malla gruesa de 1000 x 1000 [m] (Figura 38), la segunda malla mediana de 250x250 [m] (Figura 39) y finalmente la malla de resolución más fina de 5x5[m] (Figura 40).

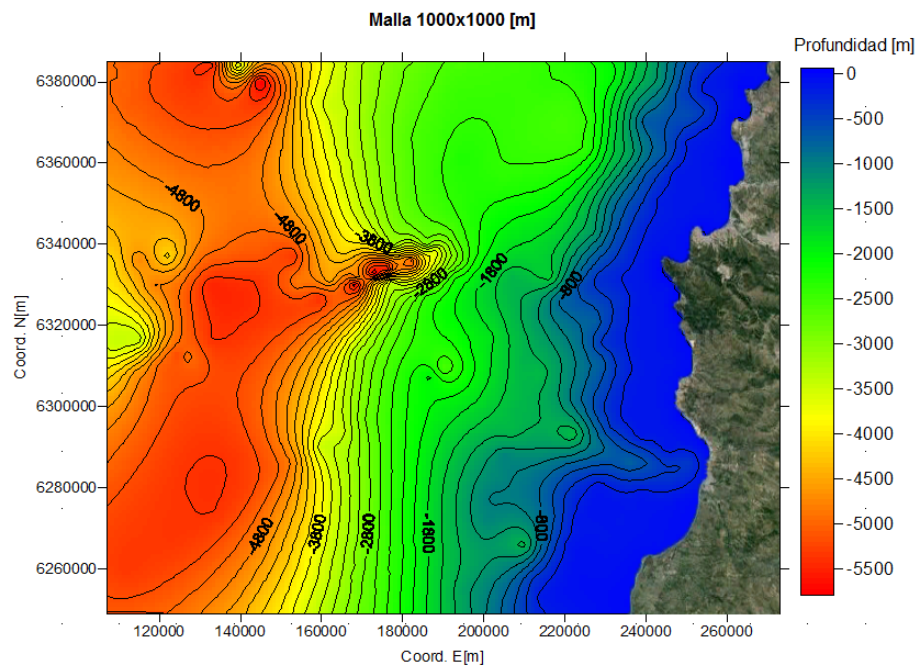


Figura 38: Malla 1000x1000[m]

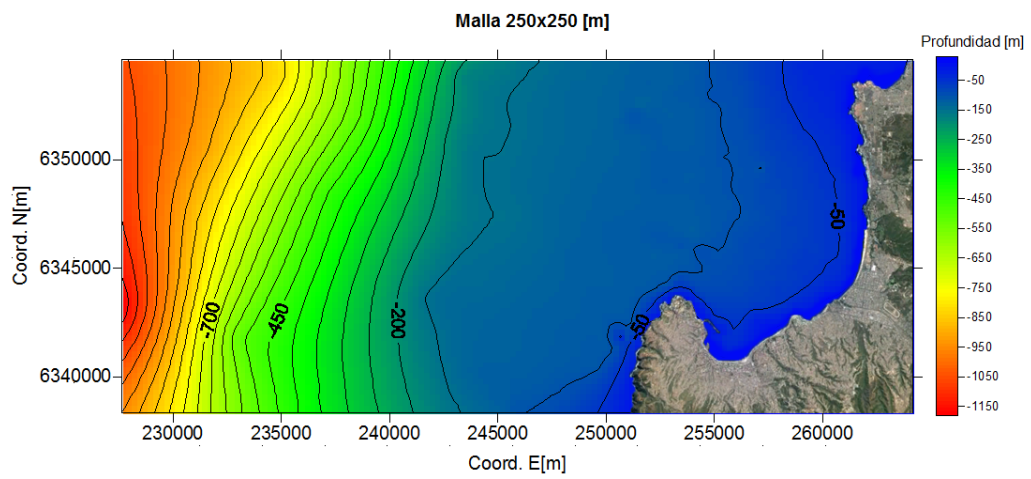


Figura 39: Malla 250x250 [m]

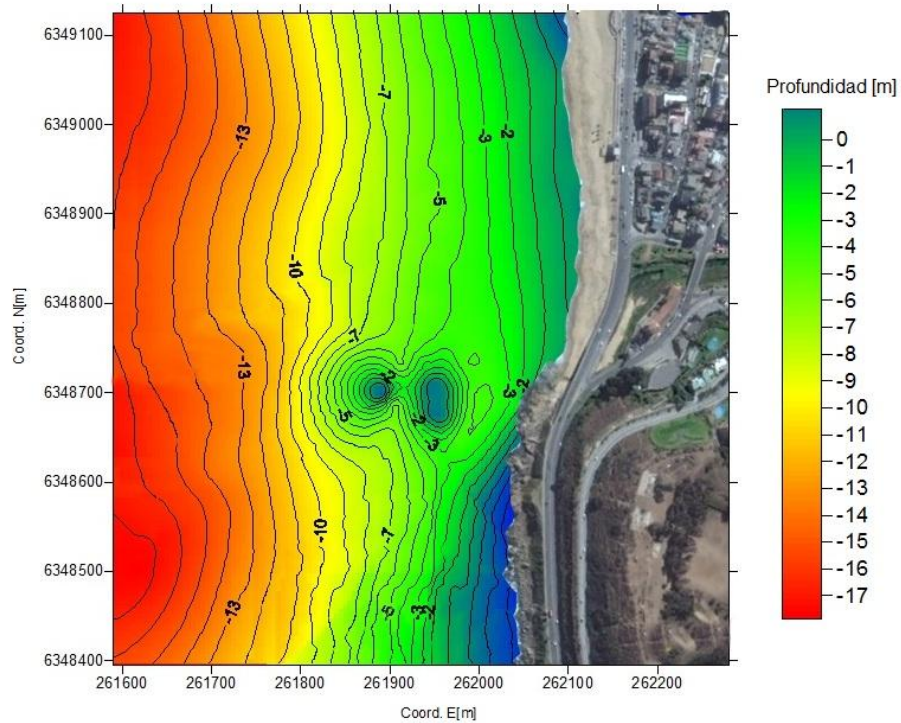


Figura 40: Malla 5x5 [m]

Mediante la modelación se corroboró el valor final de pendiente promedio del fondo que existe en el sector, siendo este de 0,0366 equivalente aproximadamente a 1:27 como se muestra en el Gráfico 4. Para su determinación se utilizaron los resultados del análisis de los 3 niveles de marea seleccionados, con el fin de corroborar si existía alguna diferencia sustancial.

Gráfico 4: Pendiente de fondo

Fuente: Elaboración Propia

Además se determina el tipo de rompiente en el sector, que corresponde a una rompiente de tipo voluta, obtenida mediante Irribarren, cuyo valor es además cercano al descrestamiento, características que se comprueban al visitar la playa. El tipo de voluta presente, se caracteriza por ser de tipo “Close-out”, lo que lo hace un sector no propicio para el surf.

5.2 MAREA

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada define marea como:

“El ascenso y descenso rítmico y alternado de la superficie del océano (o nivel del agua) y de los cuerpos de agua conectados con el océano, tales como: estuarios, golfos y canales, que ocurren dos veces al día sobre la mayor parte de la Tierra, y que resultan de la atracción gravitacional de la Luna y en menor grado de la del Sol, actuando desigualmente sobre partes diferentes de la Tierra en rotación”

Las mareas presentes en el sector, son de régimen mixto semidiurno, es decir, se presentan 2 pleamares y 2 bajamares con una diferencia de 6 horas y 12 minutos entre plea y bajamar. Según la publicación 3009 del SHOA, que registra información desde 1941 a 1970. Las alturas de marea referenciadas al nivel de reducción de sonda son las siguientes:

- **Altura de Pleas Máxima:** +2.07 [m]
- **Altura de Bajas Máxima:** -0.02 [m]
- **Amplitud de Marea en Sicigias:** 1.66 [m]
- **Nivel Medio del Mar:** +0.91 [m]

Para el estudio se utilizarán el promedio de pleas más altas, el promedio de bajas más bajas y el NMM, con el fin de tener las características del oleaje en la costa en estas tres condiciones.

5.3 CLIMA DE OLEAJE

La extensa franja de costa que posee Chile, se caracteriza por recibir oleaje desde el tercer y cuarto cuadrante, el cual posee olas generadas por la acción directa y continuada del viento o tormentas locales cercanas a la costa, presentando periodos de entre 4 a 8 segundos y grandes irregularidades, conocidas también como “Sea” o “Mar de Viento”. También se encuentra oleaje de tipo Swell, el cual ya ha abandonado la zona de generación (Sea) y se propaga a través de la superficie, resultando un estado de mar homogéneo y con menor dispersión direccional, presentando un periodo de entre 10 y 25 segundos. El Swell proveniente del sur suele generar grandes olas en los meses de invierno, las que se propagan hacia la costa chilena, disminuyendo su altura y aumento de periodo. Por otro lado, el Swell del norte proviene de olas que viajan durante los meses de verano desde las cercanías de las islas Aleutianas ubicadas entre el mar de Bering, al norte y el océano Pacífico septentrional, al sur. Estas olas presentan periodos largos de 20 a 25 segundos y recorren cerca de 15.000 [km].

Otro mecanismo de generación que llega afectar a las costas Chilenas son los ciclones tropicales, generados en aguas de América Central propagándose hacia el sur. Suelen ser de baja frecuencia pero relevantes al momento de diseñar una obra. (SHOA, 2005)

Para el diseño de cualquier obra marítima, se requiere de una correcta caracterización de los procesos hidrodinámicos que se presentarán, siendo a menudo expresado en términos de dirección, altura y periodo de la ola, por lo que el buen resultado final de la obra, depende en gran parte de que tan precisa son estas estimaciones. Luego, la caracterización del oleaje se entiende como una descripción a largo plazo.

5.3.1 Análisis de Clima Medio

Este análisis tiene por objetivo principal, estudiar la evolución del conjunto de parámetros en el tiempo y representar el oleaje en las condiciones más frecuentes o reinantes del sector, resultado indispensable para estudios de dinámica litoral y planificación de obras. Para esto se requieren mediciones de parámetros de resumen de al menos veinte años para así establecer variaciones horarias, diarias, mensuales, estacionales y cíclicas de grandes rangos. (SHOA, 2005)

Para este proyecto se utilizará la base de datos de treinta años de alturas significativas, periodos peak y dirección entre otros, extraídas de aguas profundas del nodo NOAA ubicado en las coordenadas 33° S 74° W en las afueras de la costa de Valparaíso (ver Figura 41).

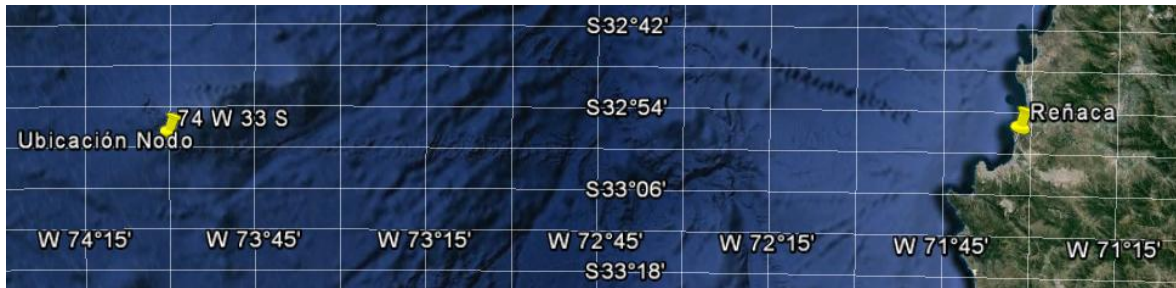


Figura 41: Ubicación de Nodo NOAA. 33° S 74° W

Fuente: Google Earth

El nodo cuenta con datos desde el año 1979 al 2009 del cual se generan tablas de incidencia que relacionan Altura/Periodo, Altura/Dirección y Período/Dirección (Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8).

También se elaboran gráficos de dispersión de los datos y rosas de oleaje con el fin de visualizar de mejor forma las variaciones de los estados de mar (Gráfico 5, Gráfico 6, Gráfico 7 y Gráfico 8).

Finalmente se generan histogramas de altura, dirección y período para un mejor análisis estadístico (Gráfico 9).

Utilizando las tablas de incidencia se identifican las condiciones de oleaje en aguas profundas con mayor frecuencia de ocurrencia, para el caso de las alturas significativas, se obtiene que el rango de 2,5 a 3 [m] presenta la mayor ocurrencia con un 22,6%. Para los períodos, se observa que el rango de los 13 a 15 [s] presenta una frecuencia de 33,86% y por último la dirección con mayor ocurrencia es del oleaje proveniente del SW con un 58,44%.

Sin embargo, no se obtiene la mayor frecuencia al juntar los rangos de altura y período antes mencionados, ésta combinación corresponde solo a un 6,49% encontrándose en cuarto lugar, siendo la mayor frecuencia de ocurrencia un 8,59% de los rango de 2,5 a 3 [m] y de 11 a 13[s]. Para el caso de la dirección en combinación tanto con la altura y el período se mantienen los mayores rangos de frecuencia obteniéndose finalmente un 13,13% y un 22,86% respectivamente.

Con la obtención de esta información procedente del análisis estadístico se definen los parámetros oleaje reinante:

- **Hs**=3 [m]
- **Tp**=13 [s]
- **Dir**= SW [225°]

Estos parámetros también corresponden al oleaje de diseño.

Tabla 6: Tabla Incidencia Altura v/s Periodo

Intervalos	Altura. Hm0 (m)														Total	Frec.		Frec.		
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7		>7	Frec. %	Frec. Acum. %	Frec. %	Frec. Acum. %
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	0,00%	2	0,00%	0,00%
5		64	197	392	110	11										774	0,85%	776	0,86%	0,86%
7	3	10	125	301	704	1216	1013	370	56	4	1					3803	4,20%	4579	5,06%	5,06%
9		141	1086	2113	1818	1056	728	385	152	34	13					7526	8,31%	12105	13,37%	13,37%
11	8	296	2140	5861	7780	6487	3517	1168	293	70	12	1				27633	30,52%	39738	43,89%	43,89%
13	6	289	1639	3993	5878	7103	5900	3681	1502	487	139	27	8			30652	33,86%	70390	77,75%	77,75%
15	2	164	987	2248	2651	2440	2120	1893	1262	760	290	92	38	11		14958	16,52%	85348	94,27%	94,27%
17	3	69	335	734	881	702	453	301	222	158	115	32	26	18		4049	4,47%	89397	98,74%	98,74%
19	25	122	226	316	316	151	98	40	21	16	8	3	1		1027	1,13%	90424	99,88%	99,88%	
21		9	31	31	13	9	1	2								96	0,11%	90520	99,98%	99,98%
23																16	0,02%	90536	100,00%	100,00%
25																90536				
Total	22	995	6508	15714	20457	19278	13849	7839	3510	1529	578	155	73	29		90536				
Frec. %	0,02%	1,10%	7,19%	17,36%	22,60%	21,29%	15,30%	8,66%	3,88%	1,69%	0,64%	0,17%	0,08%	0,03%						
Frec. Acum.	22	1017	7525	23239	43696	62974	76823	84662	88172	89701	90279	90434	90507	90536						
Frec. Acum. %	0,02%	1,12%	8,31%	25,67%	48,26%	69,56%	84,85%	93,51%	97,39%	99,08%	99,72%	99,89%	99,97%	100,00%						

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 7: Tabla Incidencia Altura v/s Dirección

Intervalos	Altura, Hm0 (m)													Total	Frec %	Frec Acum %				
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5				7	6,5	7	
E	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7	7	>7	0	0,00%	0	0,00%
N			1	4	5	3	4	9	2								28	0,03%	28	0,03%
NE																	0	0,00%	28	0,03%
NNE					2												2	0,00%	30	0,03%
NNW				4	9	9	13	21	12	3	1						72	0,08%	102	0,11%
NW	22	182	323	347	347	133	45	13	3	1	3						1072	1,18%	1174	1,30%
S	1	22	96	273	242	128	48	19	1	3							833	0,92%	2007	2,22%
SE																	0	0,00%	2007	2,22%
SSE			2	4	6	5											17	0,02%	2024	2,24%
SSW	69	864	2442	3897	4549	3794	2209	916	401	131	29	9					19316	21,34%	21340	23,57%
SW	9	462	3108	8651	11886	11776	8455	4827	2246	965	361	99	49	18			52912	58,44%	74252	82,01%
W	3	53	288	511	496	270	172	117	30	19	7						1966	2,17%	76218	84,19%
WNW	2	136	593	1085	997	530	192	48	11	2							3596	3,97%	79814	88,16%
WSW	8	252	1448	2594	2539	1761	1046	547	271	137	72	27	15	5			10722	11,84%	90536	100,00%
Total	22	995	6508	15714	20457	19278	13849	7839	3510	1529	578	155	73	29			90536			
Frec %	0,02%	1,10%	7,19%	17,36%	22,60%	21,29%	15,30%	8,56%	3,88%	1,69%	0,64%	0,17%	0,08%	0,03%						
Frec Acum %	0,02%	1,12%	8,31%	25,67%	48,26%	69,56%	84,85%	93,51%	97,39%	99,08%	99,72%	99,89%	99,97%	100,00%						

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8: Tabla de Incidencia Periodo v/s Dirección

Intervalos	Periodo, T[s]															Total	Frec %	Frec Acum	Frec Acum %	
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25								
ENE																	0	0,00%	0	0,00%
E																	0	0,00%	0	0,00%
N		15	13														28	0,03%	28	0,03%
NE																	0	0,00%	28	0,03%
NNE		2															2	0,00%	30	0,03%
NNW		20	46	6													72	0,08%	102	0,11%
NW		15	45	8	70	418	315	166	29								1072	1,18%	1174	1,30%
S	2	408	412	8	1	2											833	0,92%	2007	2,22%
SE																	0	0,00%	2007	2,22%
SSE	17																17	0,02%	2024	2,24%
SSW	289	3036	2949	5304	5076	2216	400	44	2								19316	21,34%	21340	23,57%
SW		74	3070	18082	20693	8525	2041	389	37								52912	58,44%	74252	82,01%
W		62	394	317	523	571	84	15									1966	2,17%	76218	84,19%
WNW		7	56	51	7	473	1679	918	372	24							3596	3,97%	79814	88,16%
WSW		1	59	1040	3923	3817	1548	289	41	4							10722	11,84%	90536	100,00%
Total	2	774	3803	7526	27633	30652	14958	4049	1027	96	16					90536				
Frec %	0,00%	0,85%	4,20%	8,31%	30,52%	33,86%	16,52%	4,47%	1,13%	0,11%	0,02%									
Frec Acum	2	776	4579	12105	39738	70390	85348	89397	90424	90520	90536									
Frec Acum %	0,00%	0,86%	5,06%	13,37%	43,89%	77,75%	94,27%	98,74%	99,88%	99,98%	100,00%									

Fuente: Elaboración Propia

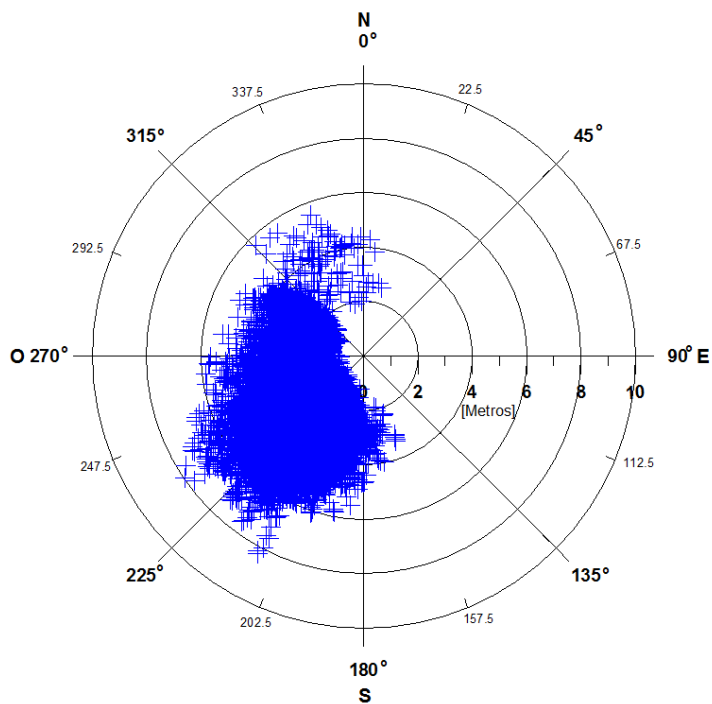


Gráfico 5: Dispersión de Altura de Ola

Fuente: Elaboración Propia

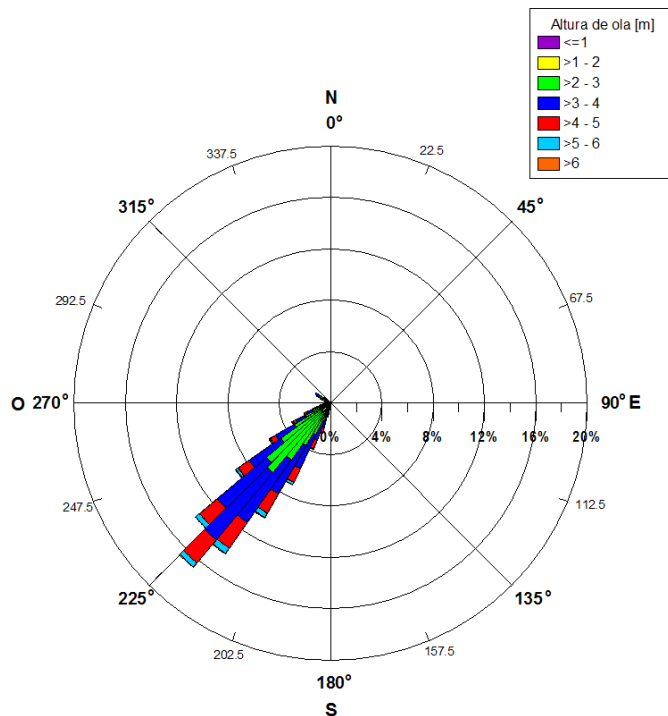


Gráfico 6: Rosa de Oleaje – Altura de ola

Fuente: Elaboración Propia

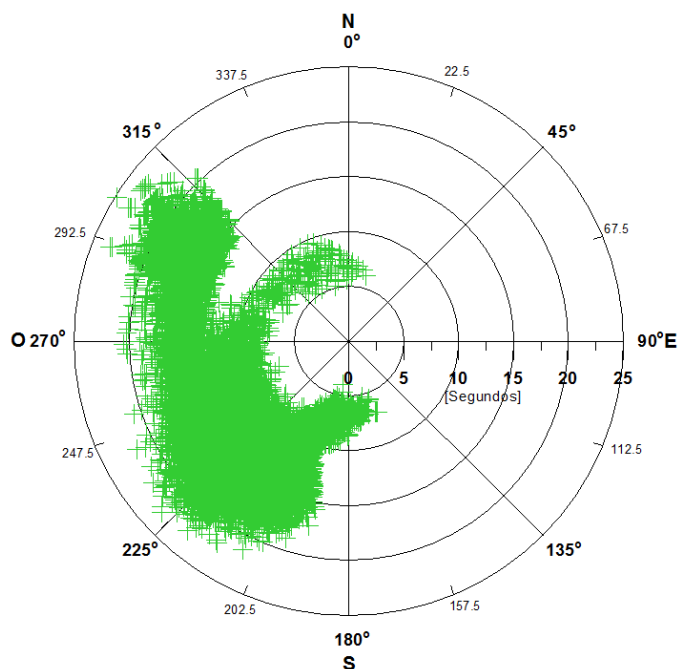


Gráfico 7: Dispersión de Periodo

Fuente: Elaboración Propia

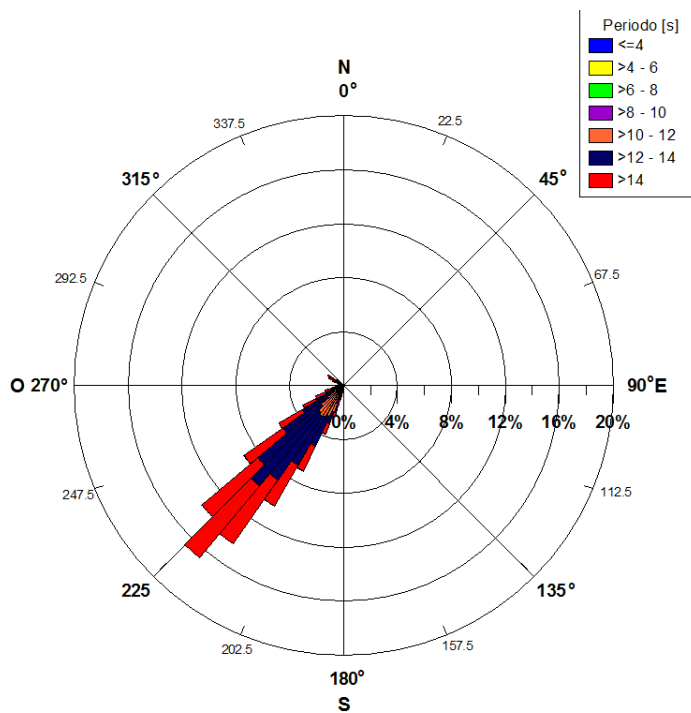


Gráfico 8: Rosa Oleaje – Periodo

Fuente: Elaboración Propia

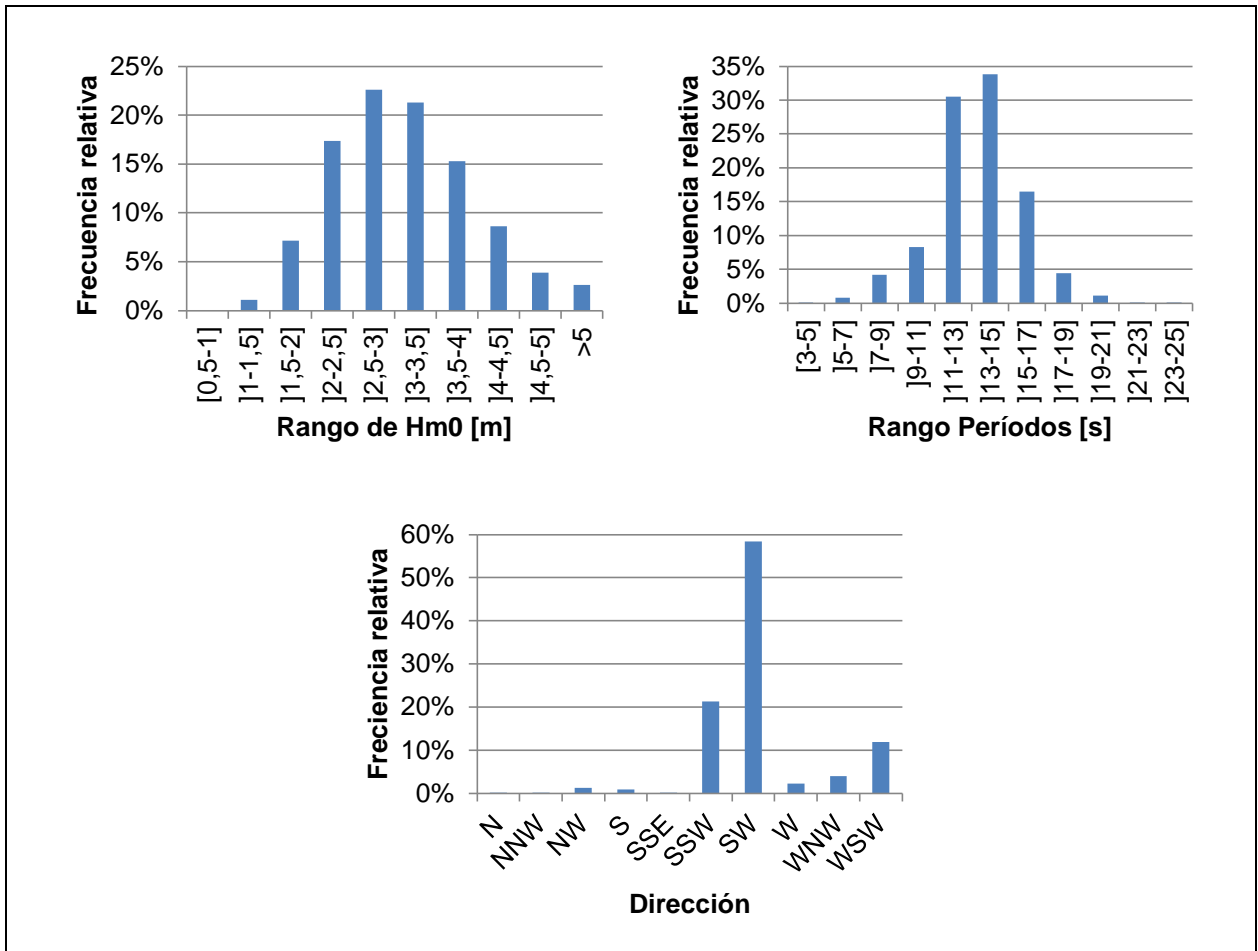


Gráfico 9: Histogramas

Fuente: Elaboración Propia

5.3.2 Análisis de Clima Extremo

Este análisis busca determinar los valores esperables de los parámetros en los próximos 50 o 100 años, es decir fenómenos de condiciones de mayor intensidad.

Se define de mejor manera el régimen extremal como la función de distribución de los valores extremos de una determinada variable que expresa la probabilidad de que cierto valor no sea superado o minorado en un período prefijado.

Para el estudio se utilizan métodos estadísticos diseñados específicamente para este fin, los que pueden ser clasificados en métodos de distribución inicial (muestra total) y método de los valores extremos, que será utilizado para el estudio

El clima extremo corresponde a temporales que provienen generalmente desde el WSW al NNW que se presentan en épocas de invierno con gran cantidad de energía.

Se tiene en cuenta que la extrapolación a valores extremos no debe sobrepasar siete veces el número de años. Como lo determina el SHOA, se analizaron las mayores tormentas ocurridas en los 30 años de datos que se poseen, es decir un evento por año.

El análisis estadístico de los valores extremos se realiza con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años.

Las distribuciones utilizadas fueron de Gumbel y Weibull con sus diferentes coeficientes k . El Gráfico 10 muestra la comparación de estas distribuciones mediante la probabilidad de ocurrencia del oleaje extremal.

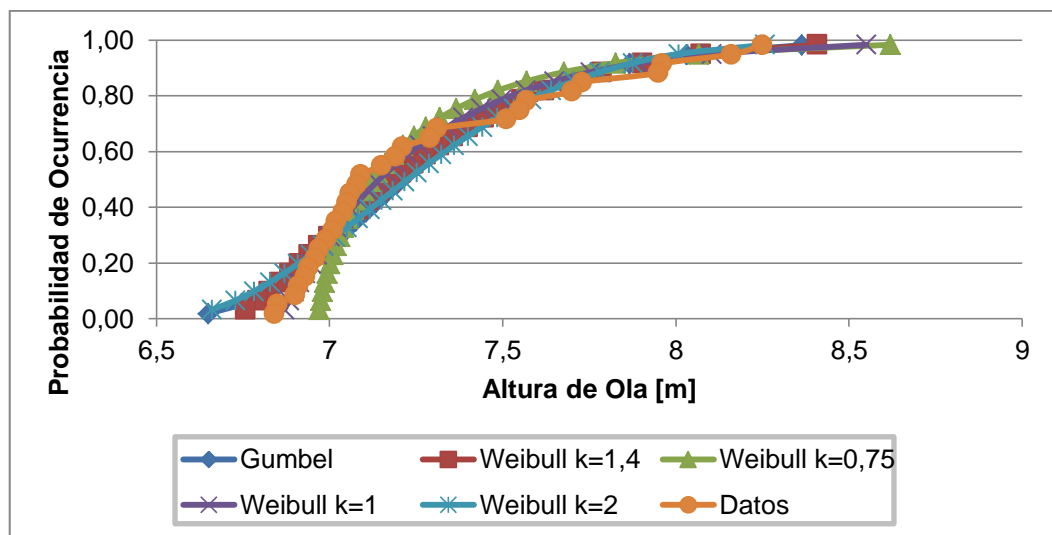


Gráfico 10: Comparación de distribuciones

Fuente: Elaboración Propia

El Gráfico 11 muestra el cálculo de banda de confianza con un 95% de la distribución de Gumbel, esto implica que existe un 95% de probabilidad de que los datos de alturas estimadas se encuentren dentro de zona.

Se determina que mediante Gumbel existe un mejor ajuste que por Weibull.

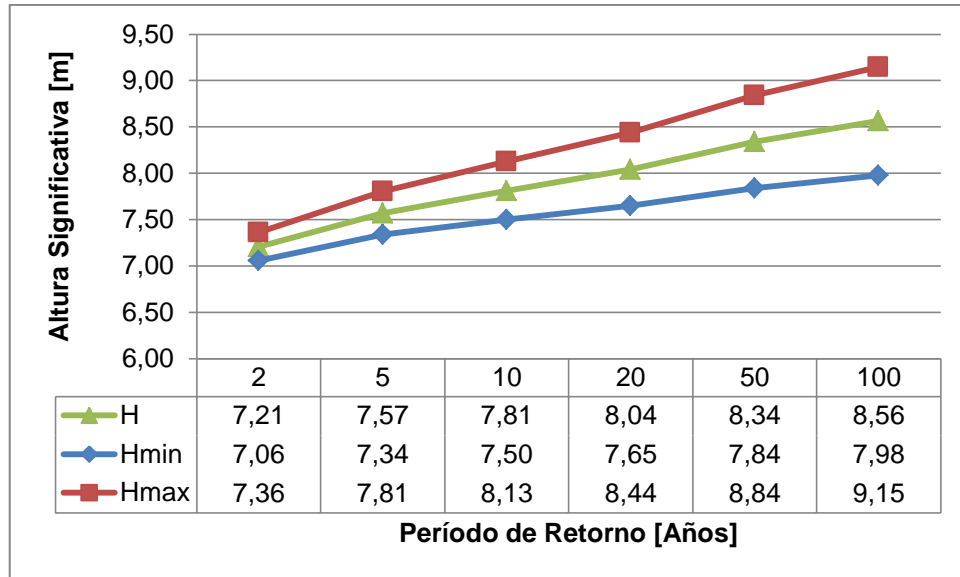


Gráfico 11: Altura Significativa con Banda de confianza del 95%

Fuente: Elaboración Propia

Se utilizaron sólo estas dos distribuciones debido a que son los más utilizados para el análisis de clima extremo

Con el fin de conocer el comportamiento del oleaje en el sector en condiciones extremas, se utilizarán los parámetros con de los diferentes periodos de retorno estudiados, con dirección promedio del NW (315°) y 14 segundos de período.

Los modelación de los casos extremos se presentan con la estructura propuesta en la sección 7.5.3.1

5.4 ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICO

Un análisis granulométrico realizado por Valenzuela (1979), dio como resultado la presencia de un sedimento predominantemente de arena gruesa, a lo largo de la zona de estudio, siendo este, desde las Torpederas hasta la playa de Reñaca. El sedimento en la playa de Reñaca se clasificó como cuarzo feldespático, con un diámetro promedio de 0.77 [mm] y alta permeabilidad (Valenzuela, 1979). El hecho de que existe un exceso de gruesos y una ausencia prácticamente total de las fracciones finas, se debe a los distintos niveles de energía cinemática que se caracteriza a los ambientes de playa. En particular se destaca la ausencia de partículas con diámetros inferiores a 15.6 micrones, que poseen una velocidad de sedimentación en el umbral de movimiento granular de 2 [cm/seg]. Según González (1976), la composición de los sedimentos concuerda con la composición química, índice de color y granulometría de las rocas ígneas y metamórficas que se encuentran en el basamento cristalino costero.

En el ambiente intermareal, la energía cinética de las olas es función de la morfología costera y del período de las olas que rompen en la playa. Según Urra (1973), las costas chilenas son afectadas por temporales que originan marejadas con periodos significativos que oscilan entre los 5 a 20 segundos, las que pueden desplazar partículas de arena gruesa y muy gruesa hasta una altura orbital de 1.1 [m] con velocidades que varían entre 30 y 35 [cm/seg].

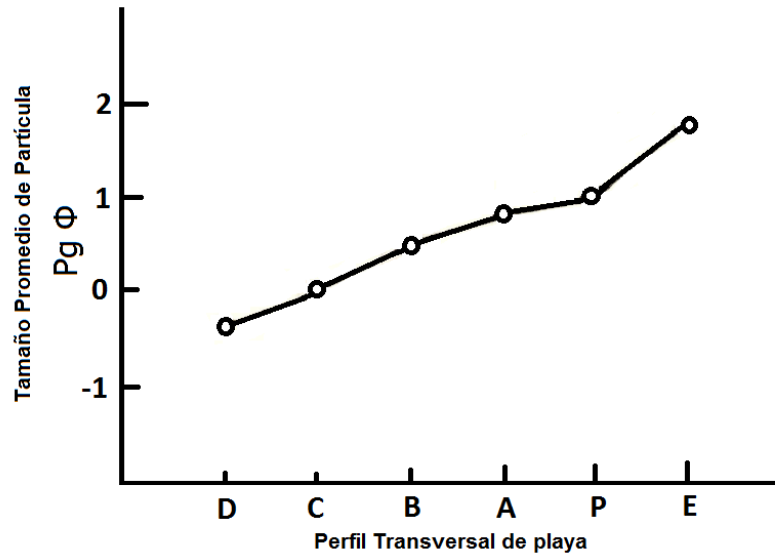


Figura 42: Tamaño de partículas en la terraza vs. Ubicación de partícula: Duna (E), Playa (P), Berma(A), Cara de playa (C) y Terraza de Bajamar (D).

Fuente: Valenzuela (1979)

La Figura 42 muestra que el tamaño promedio de las partículas disminuye desde la terraza de bajamar hacia la berma de la playa, donde la energía cinética de la ola es mínima. La letra E y P representan las dunas y la playa respectivamente. "A" corresponde a la berma, B y C la cara de la playa y D la terraza de bajamar.

Las playas abiertas como Reñaca, presentan longitudinalmente diversos estados de equilibrio que aparentemente son causados por el ángulo de incidencia de las olas, dicha playa presenta un flujo en dirección norte, con un nivel intermedio de energía según Valenzuela (1979).

La presencia de ondulaciones en la terraza de bajamar, sugieren que el régimen de flujo crítico en la zona de bajamar y supercrítico en la cara de la playa. La pendiente del fondo determina el sentido de movimiento de las partículas. En las aguas detrás del punto de rompiente, el sedimento es transportado mar afuera por la acción de corrientes de resaca y que en la terraza de bajamar quedan solamente las fracciones más gruesas. Aguas afuera del punto de rompiente, el transporte es selectivo y hacia la playa donde las partículas se clasifican por tamaño como en la Figura 42.

En la plataforma se observa que la energía dinámica del oleaje disminuye a medida que aumenta la profundidad y entre los 20 y 110 [m] se encuentra un fondo cubierto predominantemente por limos gruesos con una velocidad de sedimentación de 0,083 [cm/seg] que para que estas partículas se mantengan en suspensión es necesario que la velocidad del flujo sea mínimo 12 veces la velocidad de sedimentación (Blatt et al., 1972) cita de Valenzuela (1979).

5.5 ESTUDIO GRANULOMÉTRICO 1981

En el año 1981 se hizo un estudio de las playas de la bahía de Valparaíso, con el fin de determinar los parámetros granulométricos que caracterizan a la región, dentro de los cuales se encuentra la playa de Reñaca, y por otro lado, definir la relación de estos parámetros con los agentes que causan el transporte y la depositación de los sedimentos (Vergara y Valenzuela, 1981).

Se realizaron 3 perfiles perpendiculares a la línea de playa, en el sector 1 (Perfil Sur), en el centro de la playa (Perfil Medio) y entre el sector 4 y 5 (Perfil Norte), donde se tomaron 3 muestras a 3-4 [cm] de profundidad a lo largo del perfil, en la parte trasera de la playa, en la zona de playa media y en la zona intermareal como se muestra en la Figura 43. Las letras A, B y C indican la ubicación de las zonas muestreadas

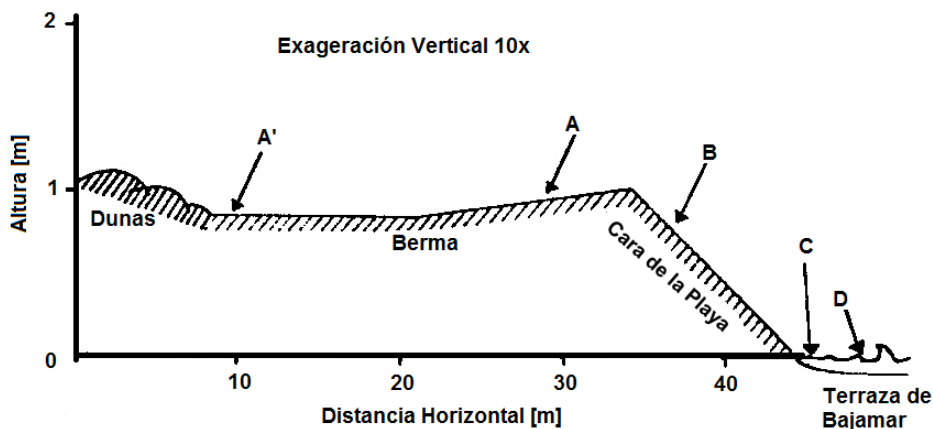


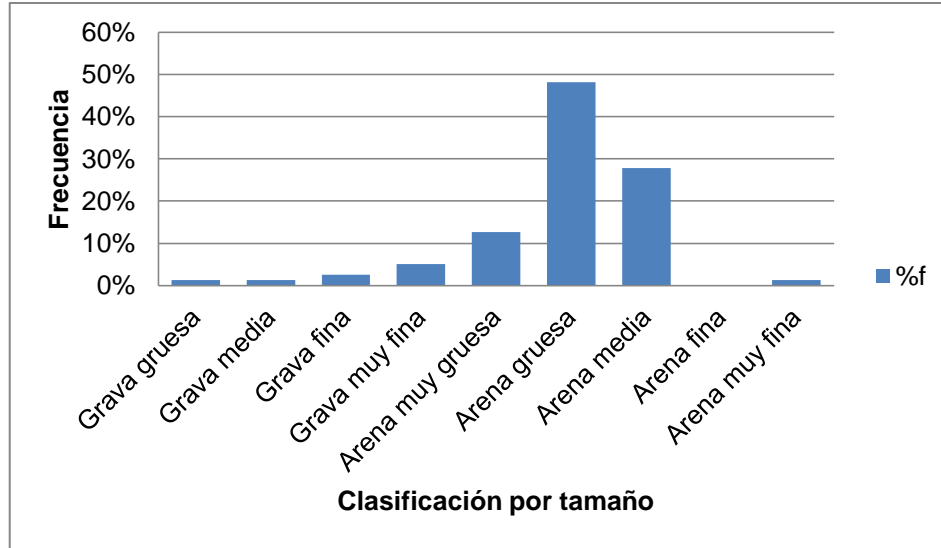
Figura 43: Perfil idealizado perpendicular a la ribera.

Fuente: Vergara y Valenzuela (1981)

El tipo de sedimento predominante en el sector corresponde a una arena gruesa cuarzofeldespática.

El Gráfico 12 muestra una asimetría negativa en el histograma de frecuencia de los sedimentos, con un moderado exceso de gruesos y una ausencia casi total de las fracciones más finas.

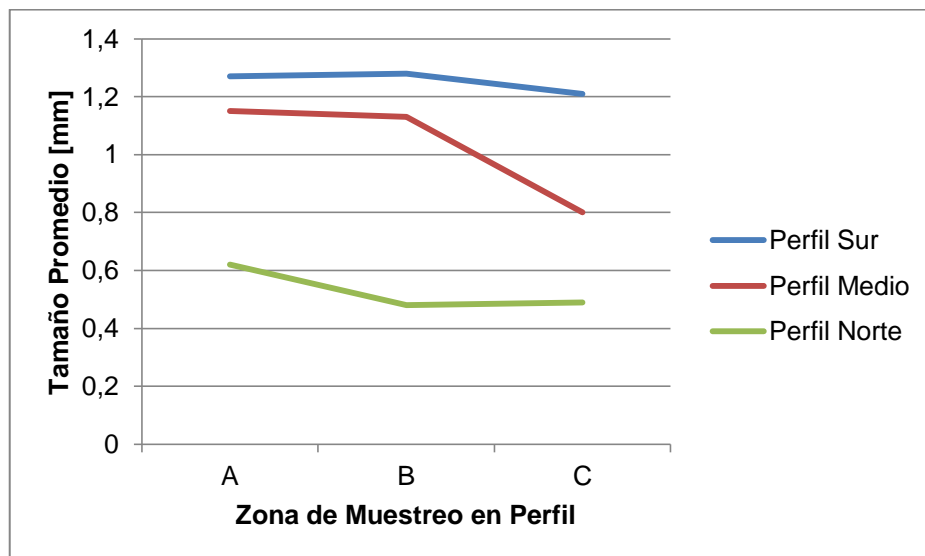
Gráfico 12: Histograma de Frecuencia de Sedimentos



Fuente: Vergara y Valenzuela (1981)

En la zona de baja marea se registró un dominio de arenas muy gruesas, en la berma o playa media, arena gruesa y finalmente en la parte trasera o duna se encuentra arena media. La playa presenta un estado de equilibrio erosional con graduación heterogénea en el sector 1 y 5 (Perfil Sur y Norte) y en el centro de la playa (Perfil Medio) se presenta un estado depositacional con graduación normal, esto debido a la intensidad del oleaje que incide en los distintos sectores de la playa.

Gráfico 13: Tamaño Promedio de Sedimentos 1981



Fuente: Elaboración Propia

Existe también en la playa una dirección de flujo del Norte, lo que indica el cuadrante desde donde proviene la corriente que causa la disminución del tamaño promedio de las partículas en el sentido del flujo por la transformación de la energía potencial de las olas en energía cinética. El Gráfico 13 muestra que en el sector norte de la playa, el sedimento presenta un tamaño entre los 0.4 y 0.6 [mm], al contrario del sector sur que está entre 1.2 y 1.4 [mm] de tamaño.

Vergara y Valenzuela (1981) indican también el nivel de energía presente en la playa para mover las partículas más predominantes, siendo un nivel de energía intermedia para arena gruesa.

Por otro lado se determinó que Reñaca está dentro de las playas que presentan el mayor grado de contaminación de partículas sólidas provenientes del estero.

5.6 ESTUDIO GRANULOMÉTRICO 2012

En octubre del 2012 se hizo un muestreo a lo largo de los 5 sectores de la playa de Reñaca, con una separación promedio de 210 [m]. En cada perfil se tomaron 3 muestras a los 5 [cm] de profundidad, en la zona sumergida (Px.1), zona media (Px.2) y parte trasera de la playa (Px.3), como se muestra en la Figura 44. El muestreo se realizó el 18 de Octubre a las 9:00 am con el fin de tomar las muestras en la marea más baja del mes.

En el sector uno sólo se tomaron dos muestras debido a que el ancho de la berma es reducido, por lo que no se consideró el punto P1.3 de la playa trasera.

La zona sumergida será considerada como 1, la playa media 2 y por último 3 la playa trasera. En total se tomaron 17 muestras de la playa.

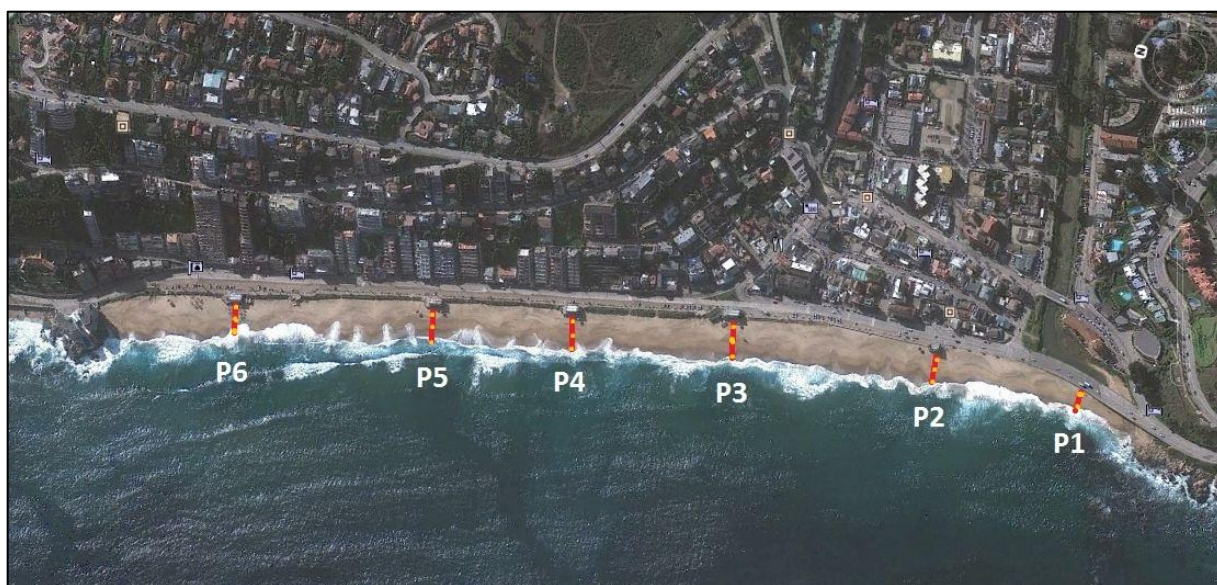


Figura 44: Perfiles

Fuente: Superior Google Earth, Inferior elaboración propia

Las coordenadas de cada muestra se exponen en la Tabla 9. El perfil transversal 1 toma como referencia la iglesia y los perfiles del 2 al 6 toman como referencia el centro de las terrazas ubicadas en la playa.

Tabla 9: Coordenadas de las muestras.

P	1		2		3	
1	32 58,406 S	71 32,718 W	32 58,410 S	71 32,721 W	---	
2	32 58,305 S	71 32,723 W	32 58,307 S	71 32,727 W	32 58,308 S	71 32,720 W
3	32 58,170 S	71 32,747 W	32 58,172 S	71 32,741 W	32 58,169 S	71 32,726W
4	32 58,170 S	71 32,747 W	32 58,172 S	71 32,741 W	32 58,169 S	71 32,726W
5	32 57,976 S	71 32,789 W	32 57,973 S	71 32,780 W	32 57,972 S	71 32,771 W
6	32 57,843 S	71 32,822 W	32 57,841 S	71 32,810 W	32 57,840 S	71 32,804 W

Fuente: Elaboración Propia

Udden-Wentworth propuso en el año 1922 la clasificación de los granos según su diámetro, la que puede ser utilizada para cada tamiz (Tabla 10). De la clasificación podemos encontrar bloques, bolones, gravas, arenas, limos y arcillas. En este análisis nos enfocaremos desde las arenas hasta los más finos.

Tabla 10: Clasificación de Granos

Nº Tamiz	Diámetro [mm]	Unidades PHI	Clasificación
Nº 5	4	-2	Grava Fina
Nº 10	2	-1	Grava Muy Fina
Nº 16	1	0	Arena Muy Gruesa
Nº 40	0.5	1	Arena Gruesa
Nº 60	0.25	2	Arena Mediana
Nº 115	0.125	3	Arena Fina
Nº 250	0.063	4	Arena Muy Fina

Fuente: Elaboración Propia

A continuación se mostraran los resultados del Perfil 1. Los perfiles restantes se encuentran en la sección 11.1.

La Tabla 11 muestra los porcentajes retenidos en cada tamiz con respecto a los 100 [gr] analizados.

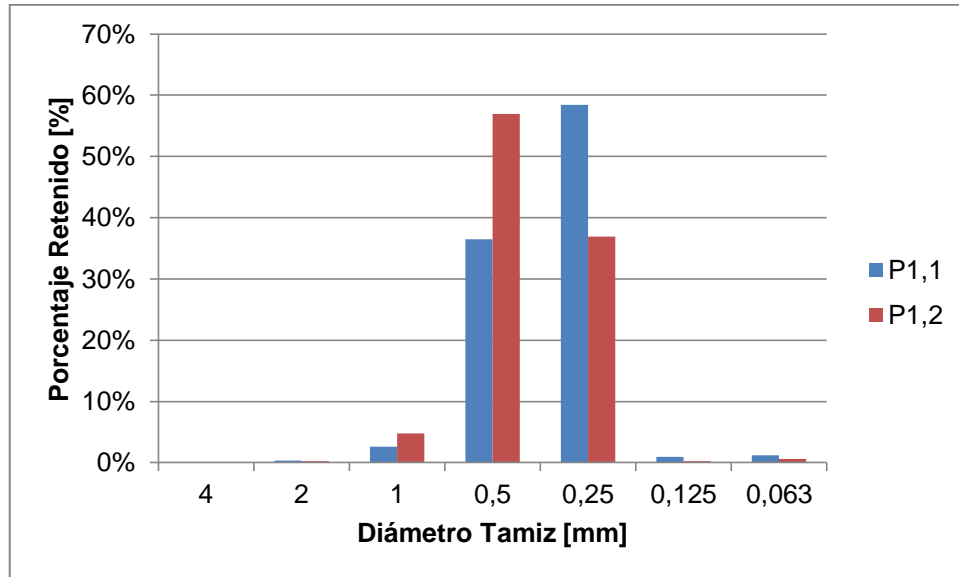
Tabla 11: Perfil 1, Porcentaje Retenido

		Diámetro [mm]						
		4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Muestra	P1,1	0,00%	0,31%	2,59%	36,51%	58,39%	0,98%	1,22%
	P1,2	0,12%	0,28%	4,79%	56,91%	36,90%	0,28%	0,62%

Fuente: Elaboración Propia

Al analizar el Gráfico 14, se puede apreciar que existe una concentración de sedimentos con diámetros entre los 0.25 y 0.5 [mm]. En este perfil, la zona sumergida presenta mayor cantidad de sedimentos con 0.25 [mm] de diámetro, correspondiendo cerca de un 58% de la muestra a “Arena Mediana” según la clasificación de granos. Al contrario de la zona de playa media que presenta más de un 56% de la muestra con “Arena Gruesa”.

Gráfico 14: Porcentaje Retenido Perfil 1



Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 12 presenta los porcentajes de la muestra que pasan a través de los tamices. Se observa que existe un mayor porcentaje de granos que pasan por el tamiz de 0.5 [mm] en la zona sumergida.

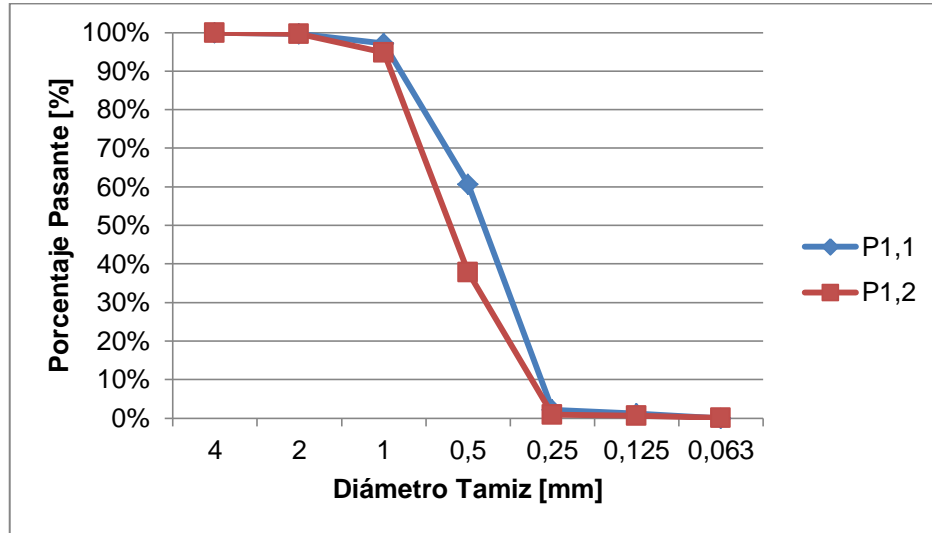
Tabla 12: Porcentaje Pasante de sedimentos.

		Diámetro [mm]						
		4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Muestra	P1,1	100,00%	99,69%	97,10%	60,60%	2,21%	1,23%	0,01%
	P1,2	99,88%	99,60%	94,81%	37,90%	0,99%	0,71%	0,09%

Fuente: Elaboración Propia

El Gráfico 15 muestra la curva granulométrica del sector sur de la playa donde los sedimentos varían mayormente entre arena mediana y arena gruesa.

Gráfico 15: Curva Granulométrica, Perfil 1



Fuente: Elaboración Propia

Para mejor comprensión, se determinó el sedimento equivalente para cada uno de los perfiles muestreados, y se desarrolló una curva granulométrica representativa para cada perfil de la playa, del Gráfico 16 se puede apreciar que no existe gran variación del tamaño de granos de un perfil a otro y no se observa ningún tipo de ordenamiento de la granulometría a lo largo de la playa.

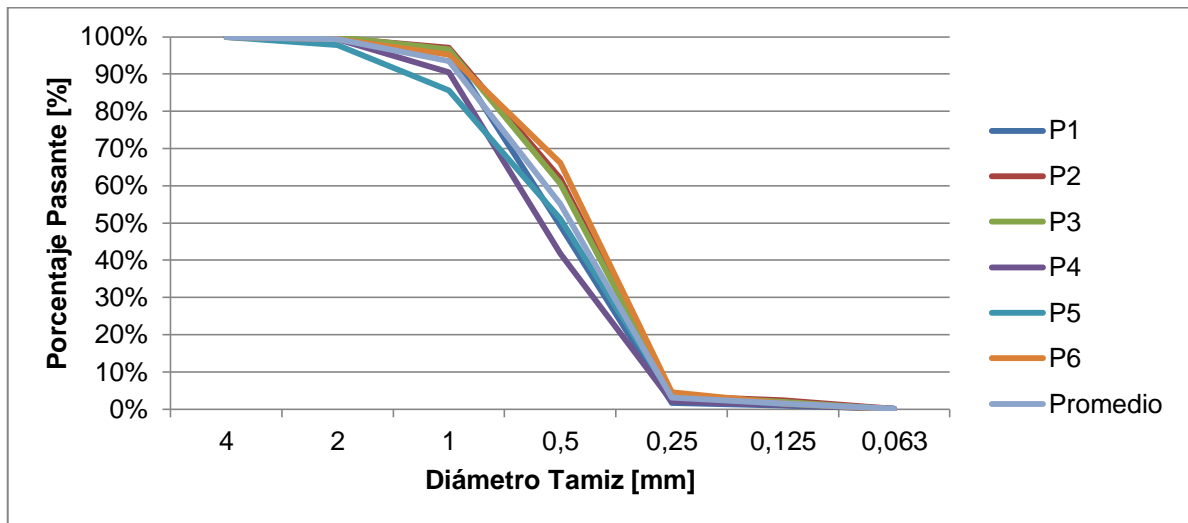


Gráfico 16: Curva granulométrica representativa

Fuente: Elaboración Propia

Mediante la obtención de la curva granulométrica, se obtienen los diámetros característicos de los perfiles, para así definir qué tipo de sedimento se ha muestreado. Los resultados serán comparados con la clasificación de Udden-Wentworth. Se definen algunos tamaños significativos del sedimento:

- D90 = diámetro del sedimento que es excedido por el 90% de la muestra.
- D60 = diámetro del sedimento que es excedido por el 60% de la muestra.
- D50 = diámetro del sedimento que es excedido por el 50% de la muestra.
- D30 = diámetro del sedimento que es excedido por el 30% de la muestra.
- D10 = diámetro del sedimento que es excedido por el 10% de la muestra.

Como se puede apreciar en la Tabla 13, a lo largo de la playa, más del 64% del total de las muestras presentaron una condición “Arena Mediana” y el resto (6 muestras) una condición de “Arena Gruesa”.

Con el diámetro medio (D50) de las partículas, se determinó la velocidad de sedimentación del grano, de acuerdo a una de las expresiones propuestas por la Universidad de Cantabria. (Cantabria, 2000)

Tabla 13: Diámetros Relevantes y Velocidad de Sedimentación

Perfil	D90	D60	D50	D30	D10	Condición	ω [m/s]
P1,1	0,908	0,498	0,455	0,370	0,284	Arena Mediana	0,0575
P1,2	0,908	0,690	0,610	0,445	0,310	Arena Gruesa	0,0794
P2,1	0,960	0,620	0,510	0,400	0,295	Arena Gruesa	0,0652
P2,2	0,770	0,435	0,402	0,337	0,270	Arena Mediana	0,0502
P2,3	0,910	0,540	0,465	0,370	0,270	Arena Mediana	0,0589
P3,1	0,970	0,640	0,520	0,400	0,290	Arena Gruesa	0,0666
P3,2	0,780	0,440	0,408	0,340	0,270	Arena Mediana	0,0510
P3,3	0,900	0,540	0,470	0,375	0,275	Arena Mediana	0,0596
P4,1	0,940	0,570	0,475	0,380	0,280	Arena Mediana	0,0603
P4,2	1,456	0,800	0,710	0,535	0,345	Arena Gruesa	0,0939
P4,3	0,970	0,660	0,555	0,412	0,298	Arena Gruesa	0,0716
P5,1	1,850	0,875	0,705	0,448	0,305	Arena Gruesa	0,0931
P5,2	0,965	0,558	0,475	0,380	0,290	Arena Mediana	0,0603
P5,3	0,925	0,495	0,448	0,359	0,270	Arena Mediana	0,0566
P6,1	0,925	0,459	0,422	0,345	0,270	Arena Mediana	0,0530
P6,2	0,928	0,513	0,458	0,368	0,282	Arena Mediana	0,0580
P6,3	0,876	0,465	0,428	0,346	0,268	Arena Mediana	0,0538

Fuente: Elaboración Propia

Los valores resultantes se utilizarán para determinar el tipo de sedimento que se implementará en la playa tanto en la obra sumergida como en la alimentación de la playa para mantener su estado.

5.6.1 Análisis Estadístico

Las muestras fueron analizadas estadísticamente mediante 4 indicadores con el fin de conocer el comportamiento a lo largo de la playa. Los valores de cada muestra se encuentran en el Anexo: Análisis Granulométrico. La Tabla 14 muestra los resultados de cada clasificación

Tabla 14: Indicadores Estadísticos

Perfil	Curtosis	Asimetría	Desviación Estándar	Tamaño Promedio
P1,1	L	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P1,2	P	Simétrica	Muy Bien Clasificada	AG
P2,1	M	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P2,2	ML	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AM
P2,3	P	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P3,1	M	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P3,2	ML	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P3,3	P	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P4,1	P	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P4,2	L	Moderado exceso finos	Bien Clasificada	AG
P4,3	M	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P5,1	M	Alto exceso finos	Muy Mal Clasificada	AMG
P5,2	M	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P5,3	P	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P6,1	L	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P6,2	L	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG
P6,3	M	Alto exceso finos	Muy Bien Clasificada	AG

Fuente: Elaboración Propia

Dentro del análisis de curtosis, más de un 35% de las muestras presenta un grado de concentración medio alrededor de los valores centrales de la variable (curva Mesocúrtica), seguido por un 29% de muestras platicúrticas que presenta un reducido grado de concentración en el centro. El resto se separa entre Leptocúrtica y Muy Leptocúrtica lo que se caracteriza por presentar un elevado grado de datos concentrados en el centro, obteniendo una curva con distribución más apuntada.

Por otro lado, en el indicador de asimetría, 15 del total de las muestras que corresponde a más del 88% presentan un alto exceso de finos y sólo dos muestras se clasifican en Simétrica y Moderado exceso de finos

Al igual que en la asimetría, se aprecia en la Desviación Estándar de las muestras, más de un 88% se establecen como “Muy bien Clasificada”, esto indica el promedio aritmético de fluctuación que tienen los datos, respecto del punto central .

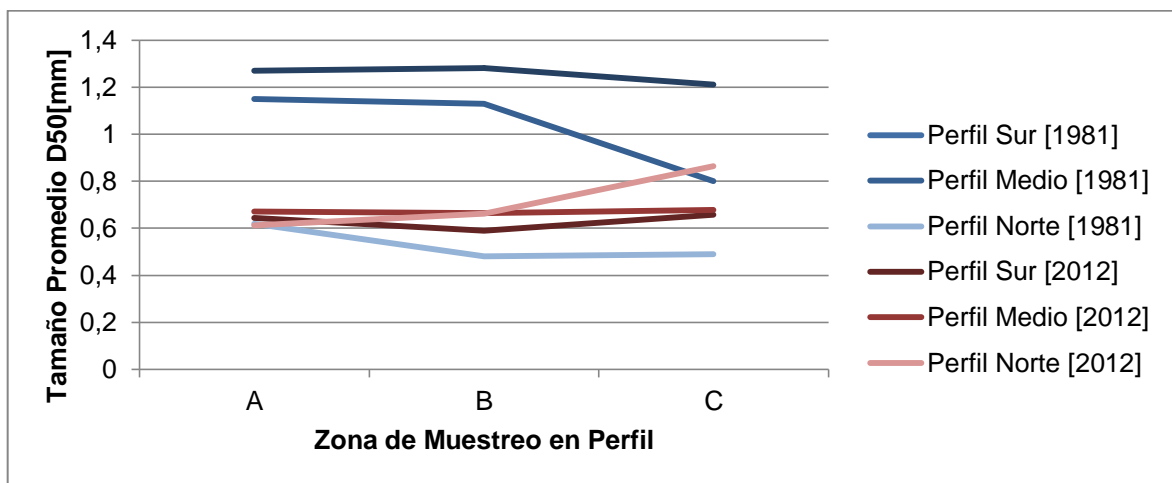
Con respecto al tamaño promedio, solo se logran apreciar 2 puntos fuera de la gran mayoría de “Arena Gruesa”, en el segundo perfil en la zona intermedia se obtuvo “Arena Mediana” y en la zona sumergida del quinto perfil, se muestreó “Arena Muy Gruesa”.

5.7 COMPARACIÓN DE ESTUDIOS 1981 V/S 2012

Para efectos de una mejor comparación de los estudios, los 6 perfiles muestreados en el 2012, fueron reducidos a 3, promediando los valores del perfil 1 con el 2, el 3 con el 4 y finalmente el 5 con el 6, así obteniendo un perfil Sur, Medio y Norte de la playa.

Como se muestra en el Gráfico 17, en el perfil Sur y Medio de la playa del año 81, el sedimento presentaba un mayor tamaño, disminuyendo a medida que se sumerge en el mar. El perfil norte se caracterizaba por presentar un tamaño de grano mucho más pequeño, donde 31 años más tarde en la parte trasera de la playa mantiene su tamaño siendo en la parte sumergida donde aumentó más de 0.3 [mm] . Los perfiles Sur y Medio disminuyeron su tamaño, manteniéndose relativamente constante desde la parte trasera a la zona sumergida de la playa.

Gráfico 17: Tamaño Promedio 1981 v/s 2012

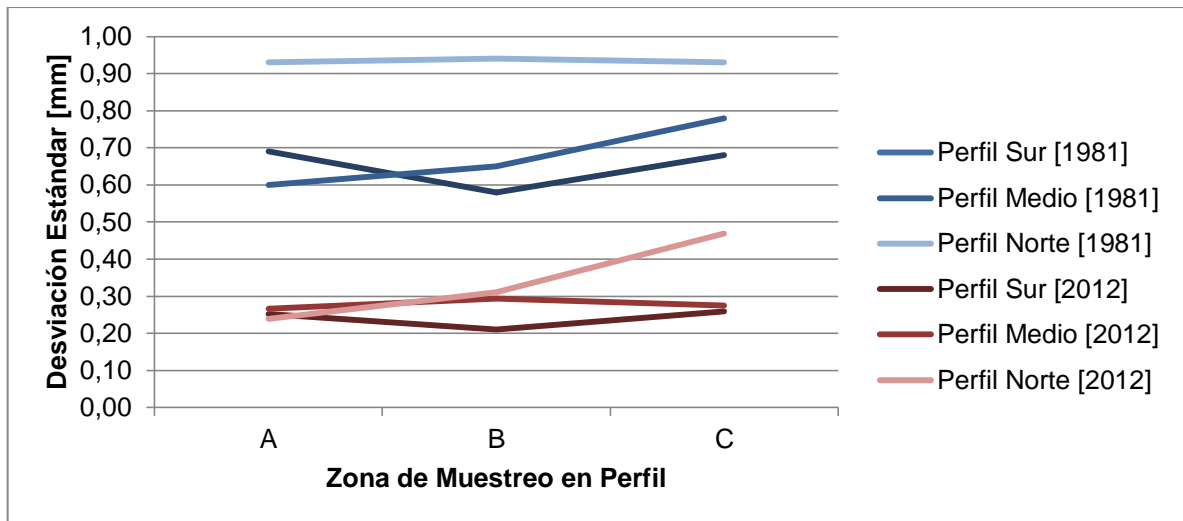


Fuente: Elaboración Propia

Las muestras reflejan una disminución general del sedimento, acotándose a un valor más central.

Con respecto a la desviación estándar de las muestras, se aprecia en el Gráfico 18, que los valores del año 1981 están muy superiores a los del año 2012, lo que implica que hace 31 años la playa presentaba un sedimento Moderadamente Seleccionado pasando a encontrarse Muy Bien Seleccionada o Clasificada. La Figura 45 muestra los resultados físicos de este cambio.

Gráfico 18: Desviación Estándar 1981v/s 2012



Fuente: Elaboración Propia

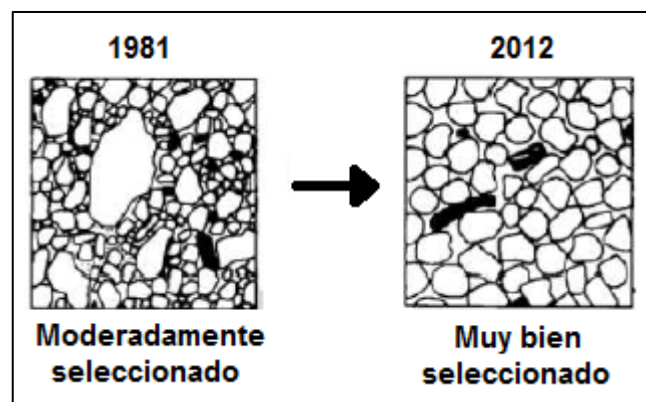
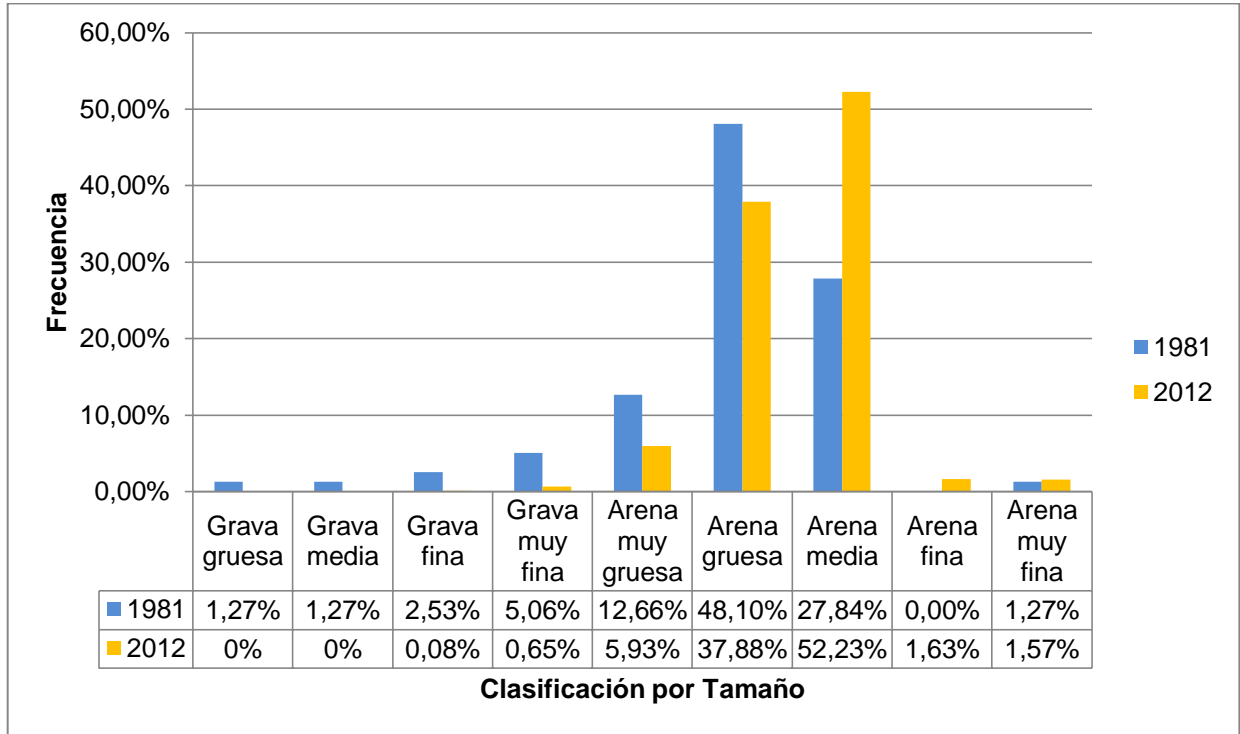


Figura 45: Desviación Estándar de 1981 a 2012. (D50)

Fuente: Elaboración Propia

Como se aprecia en el Gráfico 19 la diferencia de 31 años muestra una disminución del tamaño del sedimento, pasando de Arena Gruesa a predominar la Arena Media de D50.

Gráfico 19: Comparación 1981 v/s 2012



Fuente: Elaboración Propia

Los porcentajes de grava que existían antiguamente pasaron a ser prácticamente cero lo que implica una disminución en la rapidez del proceso de filtración del agua obteniendo un retorno de resaca más fuerte generando una pendiente levemente mayor que la que presenta más gravas (Ramos, 2009).

5.8 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Resulta relevante conocer comportamiento del transporte potencial que puede llegar a existir en la playa Reñaca, pues la implementación de una obra sumergida en el sector afectará de una u otra forma la estabilidad natural que existe en el lugar, pudiendo generar acumulaciones en un sector y erosiones en otro. La finalidad de esta sección es conocer el transporte potencial longitudinal que puede llegar a existir en la playa. Los valores obtenidos no indican la cantidad real que se transporta anualmente, sino lo que se podría llegar a mover con las condiciones de oleaje presente si existiese esa cantidad disponible de sedimentos. Resulta difícil determinar la cantidad exacta y real de sedimento que es transportado anualmente en la playa, pues la realización de mediciones es costosa y lleva tiempo (Sostenible, 2014), su precisión puede ser baja, aun teniendo datos correctos sobre el movimiento de una corriente, no se sabe de dónde procede el sedimento y cuando se inicia su movimiento. Un sistema de medición de sedimentos debe contar con instrumentos que den cuenta de cantidades y características de este, pero a la vez también de características hidrodinámicas que son los que finalmente determinan el movimiento de las partículas.

No existen estudios en el sector que indiquen la procedencia exacta del sedimento, pero se puede estimar que este proviene de crecidas importantes de los esteros aledaños que hayan arrastrado grandes cantidades de sedimentos y con el proceso de los años terminaron en la playa. Una de las mayores crecidas en el estero Reñaca y posterior aluvión, se registra en el año 1984 donde la cantidad de sedimento que se movió logró arrastrar una docena de carrocerías que hoy se encuentran en el fondo del mar en el sector de la desembocadura del estero (El Mercurio, 2007). Los dos esteros más importantes que podrían alimentar la playa son el de Reñaca por su proximidad y el Marga-Marga por su importancia. Se descarta un aporte de río Aconcagua ya que este se encuentra a unos 10 [km] aproximadamente a norte y presenta rocas sulfuradas, materiales volcánicos vítreos de texturas gruesa proveniente de los sectores de mayores pendiente en la cordillera de los Andes (Cade-idepe, 2004), los sedimentos de la desembocadura del río presentan un color gris oscuro, el cual no se observa en la playa Reñaca.

Es importante tener en consideración esta información ya que es un tópico relevante dentro de este tipo de proyectos, el cual requiere de un desarrollo más extenso, pudiendo generarse un trabajo de tesis con este tema.

A continuación se tratarán los transportes con los métodos más relevantes, utilizando de manera inicial los datos de la zona sumergida obtenida en la sección anterior. La Tabla 15 y el Gráfico 20 muestra un resumen y promedio de los porcentajes pasantes por cada uno de los diámetros del tamiz.

Tabla 15 : Porcentaje pasante de Zona sumergida

Muestra	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
P1,1	100,00%	99,69%	97,10%	60,60%	2,21%	1,23%	0,01%
P2,1	100,00%	99,41%	93,83%	49,48%	1,50%	1,28%	0,09%
P3,1	100,00%	99,98%	92,25%	47,90%	2,28%	0,49%	0,00%
P4,1	100,00%	99,90%	95,29%	54,75%	3,42%	1,44%	0,06%
P5,1	99,59%	94,25%	68,33%	36,62%	2,72%	0,74%	0,02%
P6,1	99,74%	98,61%	93,06%	70,36%	4,96%	0,87%	0,00%
- X	99,89%	98,64%	89,98%	53,28%	2,85%	1,01%	0,03%

Fuente: Elaboración Propia

Resulta evidente que gran parte de la muestra queda retenida en el tamiz de diámetro 0.25 [mm].

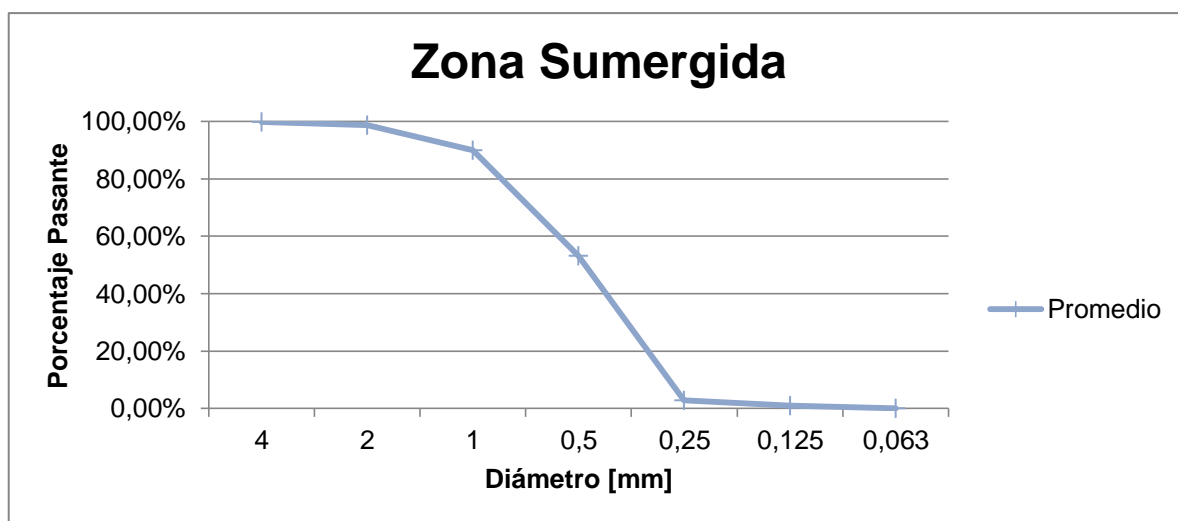


Gráfico 20: Porcentaje pasante de Zona Sumergida

Fuente: Elaboración Propia

Se obtuvo de la curva granulométrica el D50 promedio de la zona sumergida, que resultó ser **0,5145 [mm]**, clasificándose como Arena Gruesa según Udden-Wentworth(1922).

5.8.1 Estudio de transporte longitudinal mediante formulación del CERC

Para la obtención del transporte longitudinal se consideran los siguientes parámetros constantes de la Tabla 16

Tabla 16: Parámetros constantes

g	9,81 [m/s ²]	ρ H₂O	1025 [kg/m ³]	Ks	1,2
P	0,4	ρ Sedimento	2650 [kg/m ³]	Azimut	8°
K	0,39	λ	0,78	Factor Cte.	0,049775

Fuente: Elaboración Propia

Se utiliza la constante adimensional K que relaciona la cuantía longitudinal de transporte de sedimentos con el flujo de energía de las ondas con un valor de 0,39 debido a que se está utilizando la altura significativa en rompiente. Esto recomendado por el SPM84.

El coeficiente Ks se utiliza pensando en la rompiente, el azimut es utilizado con el fin de modificar las direcciones con respecto a un punto específico de la playa, donde se aplica una tangente a la costa, obteniendo el azimut con respecto al norte. Ver Figura 67 en la sección 11.1 del Anexo.

Como se utiliza estadística de oleaje en aguas profundas, el CERC propone la siguiente metodología para el cálculo del transporte longitudinal con datos offshore presente en la Ecuación 35.

Ecuación 35

$$Q_L = \frac{K\rho\sqrt{gK_s}}{32\sqrt{\lambda}(\rho_s - \rho)(1 - p)} H_0^{\frac{5}{2}} \cos^{\frac{1}{4}} \alpha_0 \sin(2\alpha_0)$$

Ql corresponde al valor del transporte longitudinal de sedimentos en **m³/s**. Como se observa en la Tabla 19, las celdas vacías indican que no existe transporte en las correspondientes direcciones.

El mayor transporte está situado en las direcciones superiores (tercer cuadrante) y como Ql+>Ql- (Tabla 17) se puede concluir que el transporte va de sur a norte.

Tabla 17:Ql+ y Ql-

Ql+	19.213.727 [m³/año]
Ql-	-523.464 [m³/año]

Fuente: Elaboración Propia

Por último se obtienen los valores de transporte bruto y neto, el primero no considera hacia donde se mueven las partículas, al contrario de segundo que si lo hace. El valor en rojo de la Tabla 19 indica el transporte neto en $[m^3/s]$.Haciendo la transformación correspondiente se obtiene la Tabla 18, donde más de 19 millones de metros cúbicos de sedimento se movieron en total en un año y cerca de 18 millones de metros cúbicos se transportaron hacia el norte en la playa en el transcurso de un año.

Tabla 18: Q bruto y Q neto

Q bruto	19.737.193	$[m^3/año]$
Q neto	18.690.263	$[m^3/año]$

Cabe mencionar nuevamente que estos son valores potenciales, lo que indica que es el volumen que se podría llegar a mover en el caso de que estuviese disponible toda esta cantidad de sedimento con las condiciones de oleaje estudiadas.

Tabla 19: Transportes Longitudinales, los valores de la tabla presentan QI [m³/s]

		Altura de Ola [m]															
		0,75	1,25	1,75	2,25	2,75	3,25	3,75	4,25	4,75	5,25	5,75	6,25	6,75	7	Totales	
278		0	0	0	0	0	-5,46E-06	-7,82E-06	-1,07E-05	-2,82E-05	0	0	0	0	0	-5,22E-05	
255,5																0	
120,5																0	
98																0	
75,5		0	4,0E-05	8,2E-04	4,0E-03	9,6E-03	1,7E-02	1,8E-02	1,3E-02	7,0E-03	3,8E-03	1,0E-03	2,9E-04	0	0	0,074	
53		2,1E-06	4,9E-04	6,4E-03	3,4E-02	7,8E-02	1,0E-01	9,5E-02	6,8E-02	3,7E-02	1,8E-02	7,7E-03	1,7E-03	3,4E-04	0	0,449	
30,5		2E-06	2E-04	3E-03	9E-03	1E-02	2E-02	1E-02	9E-03	7E-03	5E-03	2E-03	1E-04	0	0	0,082	
8		0	1,6E-05	2,1E-04	6,3E-04	9,1E-04	6,5E-04	9,6E-04	6,3E-04	2,1E-04	3,0E-05	7,4E-05	0	0	0	0,004	
-14,5		-3,99E-07	-7,16E-05	0,00098	-0,0026	-0,0035	-0,0027	-0,0010	-0,00031	0,00031	-8,06E-05	-5,18E-05	0	0	0	-0,011	
-37		0	-1,9E-05	-5,0E-04	-1,0E-03	-2,0E-03	-9,7E-04	-1,3E-04	-1,7E-04	0	0	0	0	0	0	-0,005	
-59,5		0	0	0	-9,6E-06	0,0005	-4,79E-05	-6,85E-05	-9,37E-05	-0,00012	0	0	0	0	0	0,000	
Totales		3,81E-06	6,70E-04	8,65E-03	4,39E-02	9,70E-02	1,33E-01	1,28E-01	8,98E-02	5,13E-02	2,71E-02	1,10E-02	2,12E-03	3,42E-04	0	0,593	

Fuente: Elaboración Propia

5.8.2 Obtención de la altura en rotura por método del CERC y con K de Bailard

Mediante el método que propone el CERC se determina la altura de ola en rotura, realizando iteraciones para llegar al valor más exacto, ya que la Ecuación 36 contiene el valor de H_b .

Ecuación 36

$$H_b = H_0^{\frac{4}{5}} (C_{go} \cos \alpha_0)^{\frac{2}{5}} \left[\frac{g}{\lambda} - \frac{H_b g^2 \sin^2 \alpha_0}{\lambda^2 C_o^2} \right]^{-\frac{1}{5}}$$

Junto con esto se determinan los ángulos de incidencia, una profundidad relativa que depende de la altura de ola en rotura y las características del sedimento U_{mb} y w_f .

Con respecto a la constante adimensional K, ésta se determina utilizando el estudio desarrollado por Bailard, ya que según éste, el valor de K depende del tamaño del sedimento y de su densidad, por lo que mediante modelos obtuvo que este valor resultaba de la función que integra el ángulo de rompiente y la velocidad de sedimentación del grano, obteniendo así la Ecuación 37.

Ecuación 37

$$K = 0.05 + 2.6 \sin^2(2\alpha_b) + 0.007 \frac{u_{mb}}{w_f}$$

Dónde:

Ecuación 38

$$u_{mb} = \frac{\gamma}{2} \sqrt{g b_b}$$

w_f corresponde a la velocidad de sedimentación o velocidad de caída del grano, la cual su valor depende de Reynolds de la siguiente forma:

$$\text{Si } 0.5 < Re < 400 \quad w_f = \frac{d_{50}^2 g (\rho_s - \rho)}{18\nu}$$

$$\text{Si } 400 < Re < 200.000 \quad w_f = 1.6 \sqrt{g d_{50} (\rho_s - \rho)}$$

$$\text{Si } Re > 200.000 \quad w_f = 2.6 \sqrt{g d_{50} (\rho_s - \rho)}$$

Por último se calcula el transporte longitudinal utilizando la Ecuación 39 , la que depende de las características del sedimento, la altura de ola rompiente y el ángulo de ésta.

Ecuación 39

$$Q_L = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16(\rho_s - \rho(1-p)\sqrt{\lambda})} \right) H_b^{\frac{5}{2}} \sin(2\alpha_b)$$

Nuevamente se obtuvo que $Q_{I+} > Q_{I-}$ (Tabla 20), lo que implica un transporte hacia el norte de la playa.

Tabla 20: Q_{I+} y Q_{I-} con K de Bailard

Q_{I+}	306.692.446	[m³/año]
Q_{I-}	-6.855.865	[m³/año]

Fuente: Elaboración Propia

Los valores neto y bruto se presentan en la Tabla 21, donde en el transcurso de un año se puede registrar un movimiento de sedimentos de alrededor de los 300 millones de metros cúbicos. Esto en el caso de que se encuentre esta cantidad disponible.

Tabla 21: Q_n y Q_b con K de Bailard

Q_n	299.836.581,47	[m³/año]
Q_b	313.548.312,39	[m³/año]

Fuente: Elaboración Propia

5.8.3 Distribución transversal del transporte longitudinal

Para determinar la distribución transversal de transporte, se utilizó nuevamente una base de datos de 10 años propagados en un perfil batimétrico sensibilizado con el fin de obtener una evolución de largo plazo. Para determinar la altura de ola en rotura se utilizó la formulación realizada por Battjes & Stive (1985), que posteriormente fue modificada por Nairn en 1990, quedando finalmente la siguiente ecuación:

Ecuación 40

$$H_b = h_b \left[0.39 + 0.56 * \tanh \left(33 \frac{H_0}{L_0} \right) \right]$$

Luego con el fin de determinar si la ola se encuentra en estado de rompiente o sigue siendo una ola progresiva, se comparan los valores de altura progresiva (H_p obtenida mediante TLO) con los de H_b (Obtenida mediante Battjes & Stive), y si este último es menor que la H_p , se considera como condición de ola rompiente, y en el caso que H_b sea mayor, se le da la condición de ola progresiva.

Debido a que se cuenta con información de 10 años, se encuentran casos más extremos que al contrario de ser estudiado con una menor cantidad de años se pasarían por alto, es debido a esto que el criterio utilizado encuentra olas que comienzan a romper a los 10 [m] de profundidad, siendo estos solo 13 casos aislados.

Obtenidos los parámetros de rompientes, se procede a calcular en primer lugar el transporte de sedimento mediante el método de CERC, utilizando nuevamente la Ecuación 39 sólo con valores en rotura, ya que es en esta zona donde se pretende determinar los movimientos del sedimento.

En segundo lugar se determina el transporte mediante la fórmula de Queens (1991), nombrado así por la universidad de procedencia, el académico Kamphuis incorporó el período del oleaje y el diámetro del sedimento a la fórmula convencional del CERC, realizando una serie de ensayos llegando a la siguiente ecuación:

Ecuación 41

$$Q_L = \frac{1.3 * 10^{-3}}{(1-p)\rho_s} \frac{\rho H_{sb}^3}{T_p} \left(\frac{H_{sb}}{L_{op}} \right)^{-1.25} m^{0.75} \left(\frac{H_{sb}}{d_{50}} \right)^{0.25} \text{sen}^{0.6}(2\alpha_b)$$

Dónde:

ρ : Densidad del agua de Mar [kg/m³]

ρ_s : Densidad del sedimento [kg/m³]

H_{sb} : Altura significativa rompiente [m]

Lop: Longitud de onda asociada al peak [m]

m: Pendiente media de la playa.

ρ : Porosidad

Tp: Periodo Peak [s]

α_b : Angulo incidente en rotura

d50: Diámetro característico de la muestra [mm]

Como se observa en la Tabla 22 el sector 1 de la playa Reñaca presenta un mayor transporte de sedimentos entre los 3 y 7 [m] de profundidad, esto debido a que es en este lugar donde se produce la mayor cantidad de rotura de oleaje. El Gráfico 21 representa de mejor manera los datos de la tabla. A partir de los 7,5 metros de profundidad, el transporte comienza a disminuir debido a que son menores los casos de olas que rompen en esta zona a lo largo del tiempo analizado.

Los valores obtenidos mediante el método de Queens se caracterizan por ser menores debido a que incluye variables que no considera el método de CERC, como la longitud y periodo del oleaje en aguas profundas, lo que conlleva que los resultados sean más concordantes con la realidad en cuanto a la cantidad de movimiento de sedimentos que existe en el sector.

Tabla 22: Resultados de Qn y Qb mediante CERC y Queens

CERC		Profundidad [m]	Queens	
Qn [m ³ /s]	Qb [m ³ /s]		Qn [m ³ /s]	Qb [m ³ /s]
4,35	5,42	-0,5	26,95	34,08
60,76	63,91	-1	143,76	152,70
260,62	269,94	-1,5	368,11	377,53
680,22	699,22	-2	704,63	716,25
1294,18	1333,23	-2,5	1145,09	1160,23
2121,51	2182,12	-3	1674,33	1694,24
3067,09	3150,93	-3,5	2227,25	2250,85
3891,18	3987,07	-4	2706,18	2730,91
4566,23	4692,55	-4,5	2991,94	3022,50
4585,32	4735,03	-5	2901,13	2953,84
4151,89	4307,39	-5,5	2547,15	2598,60
3307,79	3461,66	-6	2011,57	2065,03
2461,83	2587,97	-6,5	1472,03	1525,64
1656,04	1749,83	-7	984,25	1035,28
931,52	982,50	-7,5	572,73	609,34
501,95	532,59	-8	321,57	346,48
271,39	279,60	-8,5	179,53	196,71
110,57	115,13	-9	80,90	91,44
61,26	62,21	-9,5	42,46	47,99
22,31	22,31	-10	15,03	17,12

Fuente: Elaboración Propia

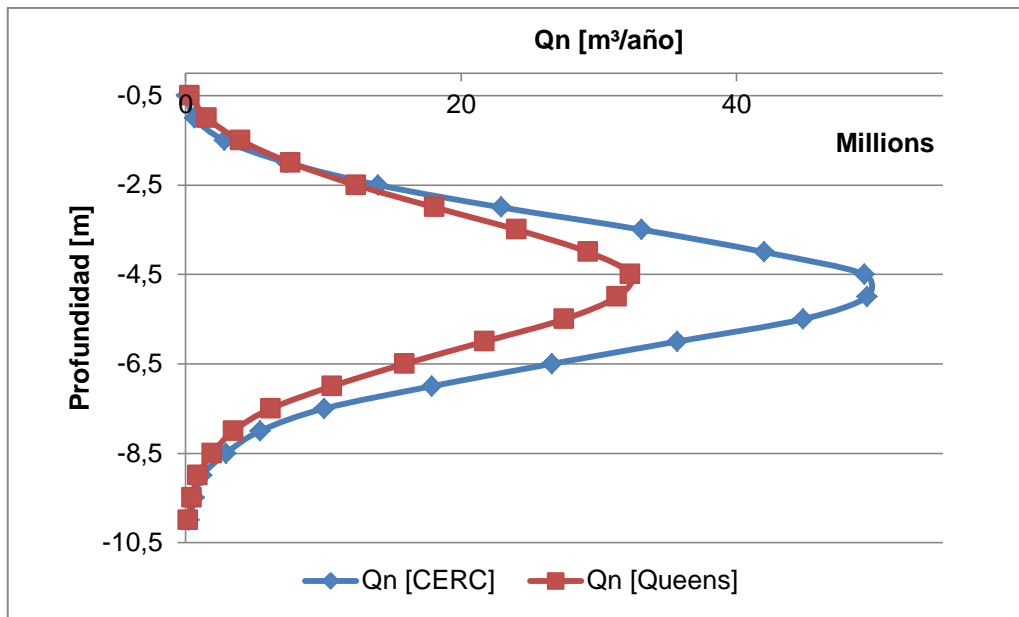


Gráfico 21: Qn por el método de CERC y de Queens

Fuente: Elaboración Propia

En ambos casos se observa que existe un transporte positivo, lo que indica que el sedimento se mueve hacia el norte de la playa. Por otro lado existe una cantidad bastante inferior que se mueve en sentido negativo la cual resulta otorga su movimiento a las corrientes del sector.

6 MODELACIÓN

6.1 CASOS SELECCIONADOS

A continuación se muestran los parámetros de oleaje de diseño que serán transferidos de aguas profundas al sector de estudio.

Para seleccionar los casos, se tomó en cuenta las mayores frecuencias de ocurrencia obtenidas de las tablas de incidencia del clima medio, las cuales son combinadas abordando los rango de altura desde 1,5 [m] a 4,5 [m] y de periodo de 9 [s] a 17 [s]. Se seleccionaron las 3 direcciones más frecuentes, las que abarcan de SW, SSW y WSW. Por otro lado también se incluye el oleaje de diseño que se obtuvo en la sección de Clima Medio.

La Tabla 23 muestra las frecuencias de ocurrencia de las distintas combinaciones con respecto al total de los datos, todas las combinaciones están asociadas a la dirección SW. Esta tabla representa a un 51,51% del total de los datos, siendo la más representativa de los estados de mar.

La Tabla 24 presenta las mismas combinaciones de estado de mar que la anterior, pero la dirección esta vez procede del SSW representando sólo un 15,67% del total de los datos.

Finalmente la Tabla 25 muestra las combinaciones desde el WSW que representan a un 10,58% de los datos no dejando de ser importante de analizar.

Tabla 23: Frecuencia de Ocurrencia del SW

		Hs [m]						
		[1,5 - 2,0]	[2,0 - 2,5]	[2,5 - 3,0]	[3,0 - 3,5]	[3,5 - 4,0]	[4,0 - 4,5]	
Tp[s]	[9 - 11]	0,55%	1,23%	0,95%	0,44%	0,15%	0,01%	3,33%
	[11 - 13]	1,31%	4,22%	5,84%	4,88%	2,57%	0,79%	19,61%
	[13 - 15]	0,83%	2,57%	4,45%	5,72%	4,69%	2,82%	21,08%
	[15 - 17]	0,46%	1,07%	1,37%	1,54%	1,58%	1,46%	7,49%
		3,15%	9,09%	12,61%	12,59%	8,99%	5,08%	51,51%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 24: Frecuencia de Ocurrencia del SSW

		Hs [m]						
		[1,5 - 2,0]	[2,0 - 2,5]	[2,5 - 3,0]	[3,0 - 3,5]	[3,5 - 4,0]	[4,0 - 4,5]	
Tp[s]	[9 - 11]	0,34%	0,65%	0,66%	0,52%	0,53%	0,35%	3,05%
	[11 - 13]	0,33%	1,12%	1,68%	1,48%	0,86%	0,30%	5,77%
	[13 - 15]	0,11%	0,41%	0,85%	1,43%	1,36%	0,95%	5,10%
	[15 - 17]	0,05%	0,15%	0,25%	0,38%	0,46%	0,46%	1,75%
		0,84%	2,33%	3,43%	3,82%	3,20%	2,05%	15,67%

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 25: Frecuencia de Ocurrencia del WSW

		Hs [m]						
		]1,5 - 2,0]	]2,0 - 2,5]	]2,5 - 3,0]	]3,0 - 3,5]	]3,5 - 4,0]	]4,0 - 4,5]	
Tp[s]	]9 - 11]	0,26%	0,37%	0,31%	0,10%	0,03%	0,01%	1,08%
	]11 - 13]	0,69%	1,07%	1,03%	0,76%	0,41%	0,15%	4,10%
	]13 - 15]	0,46%	1,00%	1,01%	0,66%	0,46%	0,29%	3,88%
	]15 - 17]	0,14%	0,30%	0,36%	0,36%	0,21%	0,15%	1,52%
		1,55%	2,74%	2,71%	1,88%	1,11%	0,59%	10,58%

Fuente: Elaboración Propia

Las 72 combinaciones de parámetros seleccionados representan finalmente a un 77,76% de los casos con lo que se puede estimar el funcionamiento de la estructura que más adelante será propuesta.

Para simplificar el proceso de transferencia de datos se realizó un análisis de sensibilidad de las variables, observando las alturas de ola como resultado, se comprobó que al variar el periodo en 2 segundos y manteniendo la altura de ola existe una variación mínima de un 3,54% del resultado. Al variar de 10 a 16 segundos de período se observa en la altura de ola una diferencia de alrededor de un 10% por lo que se conservaran estos valores extremos. Al conservar un valor medio de período para el análisis (13 segundos) existe una diferencia de un 5% con respecto a T=10[s] y un 7% con T=16[s] por lo que se conservará un valor medio. Finalmente para lograr cubrir el 77,76% del oleaje incidente se redujeron los casos de transferencia a 9, quedando en 27 con las variaciones de marea. La Tabla 26 muestra los parámetros a transferir.

Tabla 26: Combinaciones de casos a analizar

	SW		SSW		WSW	
	Hs [m]	Tp[s]	Hs [m]	Tp[s]	Hs [m]	Tp[s]
Promedio Bajas	1,5	10	1,5	10	1,5	10
	3,0	13	3,0	13	3,0	13
	4,5	16	4,5	16	4,5	16
NMM	1,5	10	1,5	10	1,5	10
	3	13	3	13	3	13
	4,5	16	4,5	16	4,5	16
Promedio Pleas	1,5	10	1,5	10	1,5	10
	3	13	3	13	3	13
	4,5	16	4,5	16	4,5	16

Fuente: Elaboración Propia

6.1.1 Transferencia

Para conocer de mejor forma la interacción del oleaje en la costa se procedió a transferir los parámetros de la Tabla 26.

Como se determinó en la sección de batimetría, se utilizaron 3 mallas con resoluciones de 1000, 250 y 5 [m] para así obtener mejores resultados de la transferencia de parámetros de aguas profundas a someras en la zona de estudio. Es en esta transición en la cual se debe tener un mayor detalle de la batimetría, pues así los procesos involucrados en la transformación del oleaje representarán de mejor forma la realidad. Es por esto que la malla más fina está contenida por la mediana la cual a su vez por la más grande, todas con la misma orientación. En la Figura 46 se muestra la transferencia del oleaje de diseño con NMM, donde se observa en la Figura 46 a), el parámetro transferido desde el Sur-Oeste mantiene su altura en aguas profundas para luego verse afectado por el fondo y la forma de la costa, pues es notable el efecto de difracción que se obtiene de la punta Ángeles en Valparaíso, también se aprecia este efecto en la Figura 46 b) donde la energía del oleaje comienza a disminuir aún más hasta llegar a la costa de Reñaca donde finalmente rompe como se observa en la Figura 46 c).

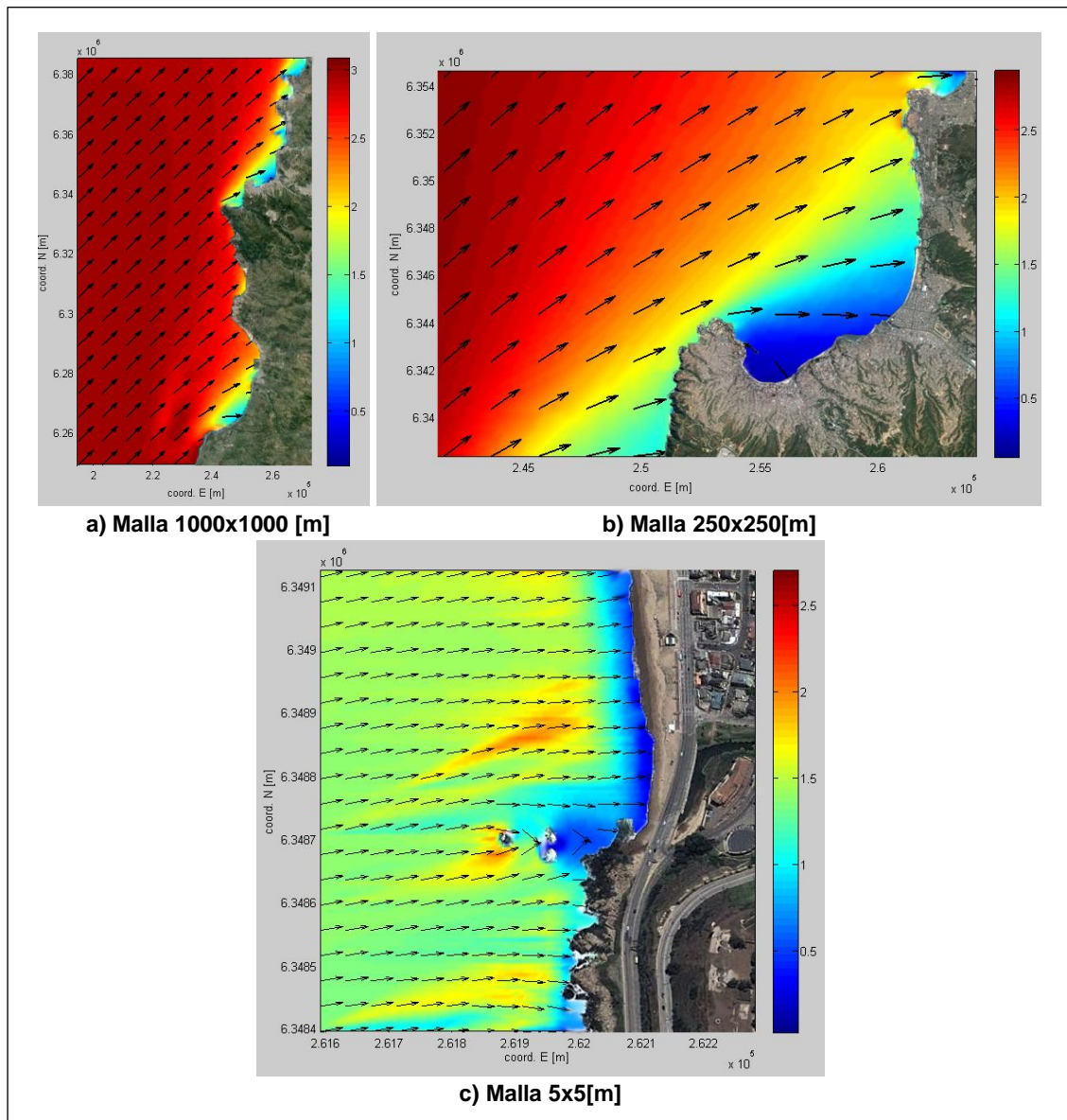


Figura 46: Transferencia de oleaje de diseño: $H_{m0}=3[m]$ $T_p=13[s]$ $Dir_m=SW$

Fuente: Elaboración Propia

Para la transferencia se utilizó una condición de borde de espectro sintético de tipo Jonswap, al cual se le aplican los parámetros elegidos en la sección anterior, para una mejor resolución de datos se utilizó un spread direccional de 5° y un coeficiente de rotura de 0.42 [Yr], siguiendo las recomendaciones realizadas por Alday (2014).

Debido a la batimetría del sector, se observa en la Figura 46 c), algunos puntos de concentración de energía donde el oleaje tiende a romper, estos puntos se mantienen constantes al estudiarlos tanto con marea baja (Figura 47 (izq)), como marea alta (Figura 47 (der)).

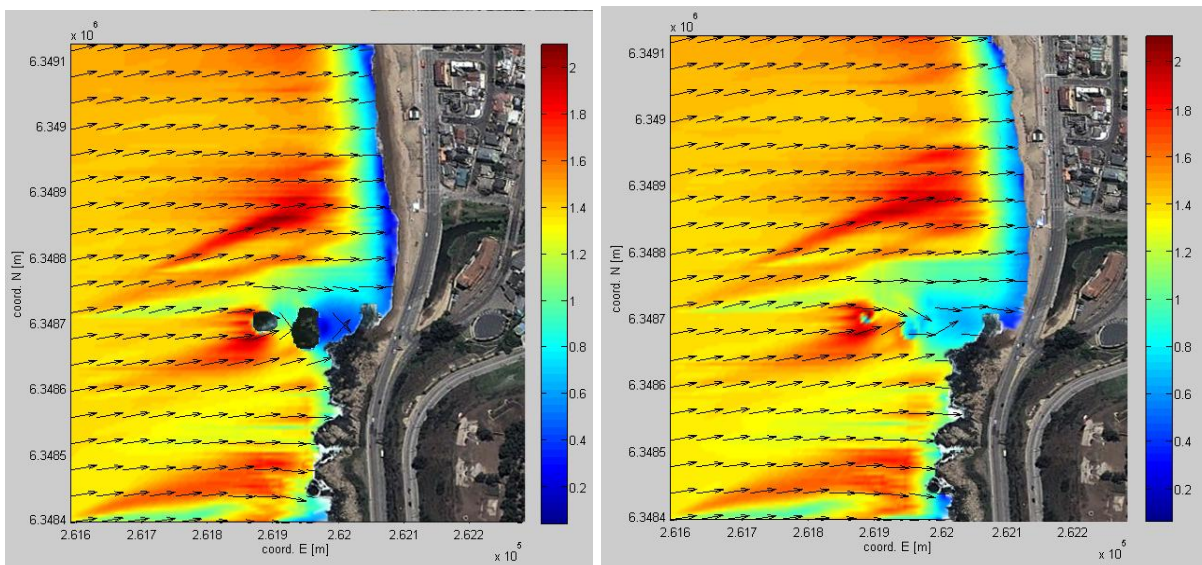


Figura 47: Transferencia Oleaje diseño. Izq: Marea Baja, Der: Marea alta.

Fuente: Elaboración Propia

Las dos rocas presentes en el agua se llevan parte de esta energía protegiendo la zona posterior, lo que refleja de cierta forma, la efectividad que tendría un dique sumergido en el sector. Esta roca queda más expuesta al momento de existir marea baja, Figura 47 (izq), y completamente cubierta al estar en Plea. Un poco más arriba se observa la mayor concentración de energía, punto que es corroborado con los mayores sobrepasos de la playa, siendo más extremo en épocas de invierno.

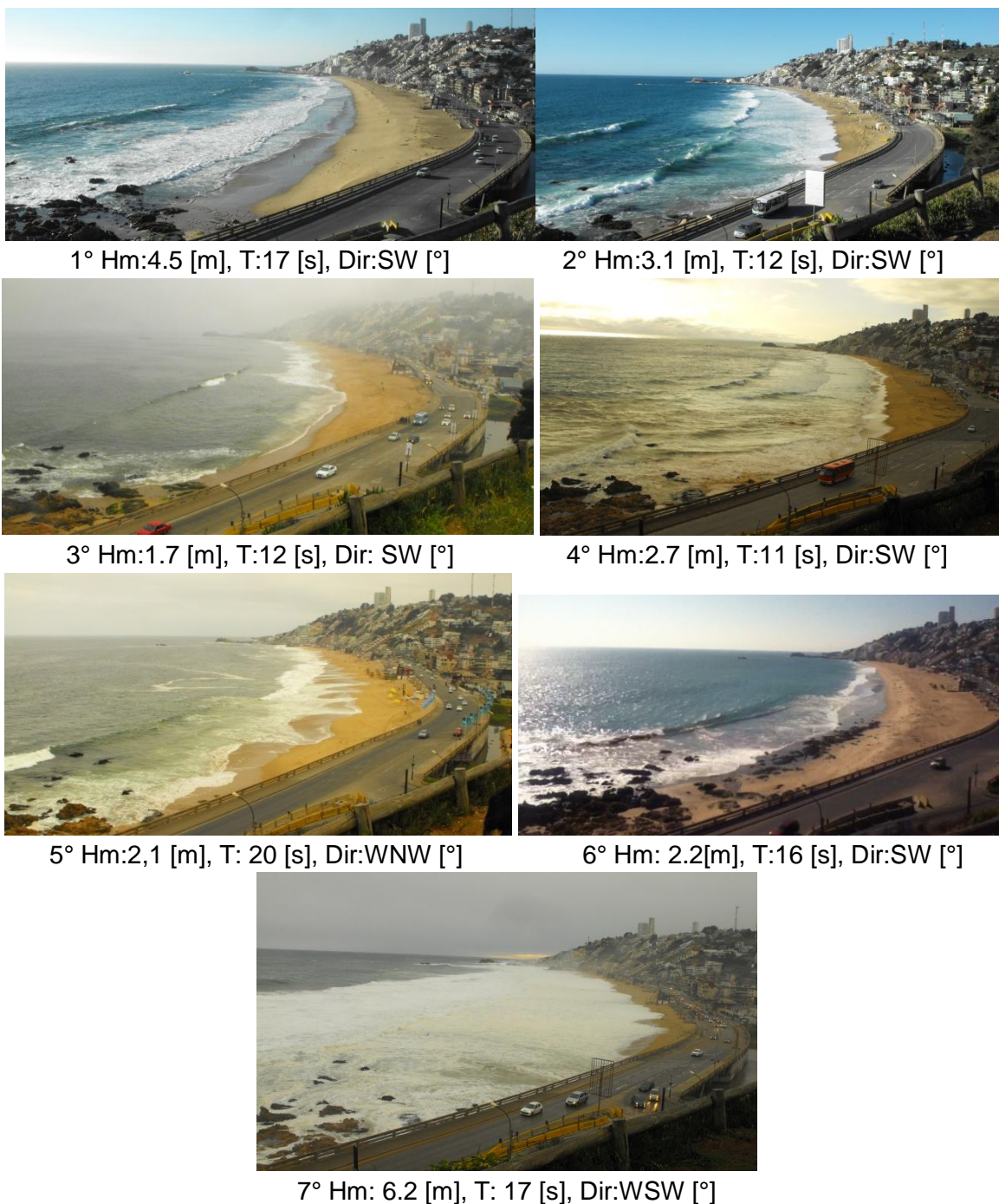


Figura 48: 1° 11 Abr 2013; 2° 20 Dic 2012; 3° 26 Sept 2012; 4° 31 May 2013; 5° 30 Ene 2014; 6° 28 Mar 2014; 7° 3 Jul 2013

Fuente: Elaboración Propia

Se corrobora con la Figura 48 que una vez que el oleaje rompe se forma una franja a lo largo de la playa, conocida como zona surf.

Para todos los casos seleccionados y transferidos se observó el mismo punto de concentración de energía variando únicamente la altura de ola en rotura, como se logra apreciar en la Figura 49 donde se muestra la modelación de los casos extremos de cada dirección.

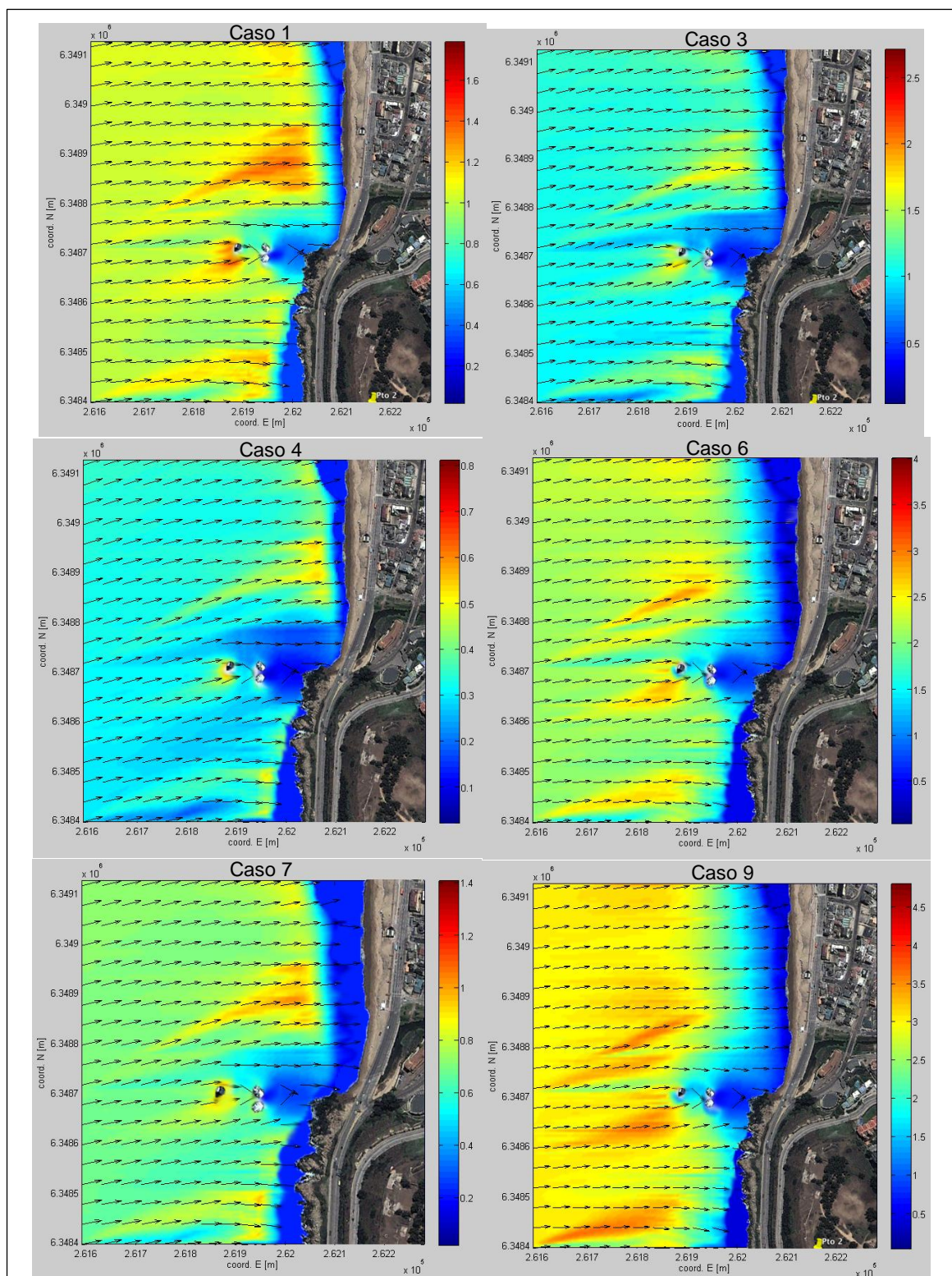


Figura 49: Modelación Casos 1, 3, 4, 6, 7 y 9 con su leyenda en metros.

Fuente: Elaboración Propia

Mediante un análisis de sensibilidad, en el sector de mayor energía, se determinó que al variar el período del oleaje dentro de los mayores rangos de frecuencia y mantener la altura de ola, existía una variación de la altura de ola en rompiente de un 10% entre los valores extremos (10 y 16 [s]). La Figura 49 muestra las comparaciones extremas, donde las imágenes de la izquierda (Caso 1, 4 y 7) presentan alturas de ola de 1,5[m] y 10[s] de período, y las imágenes de la derecha (Caso 3, 6 y 9) alturas de ola de 4,5[m] y 16[s] de período. Para los casos 1 y 3 donde se mantiene la misma dirección de incidencia (SW) existe una variación de alrededor de un 63% en sus resultados. Se observa un mayor cambio entre las propagaciones realizadas desde el SSW y el WSW de cerca del 81% en los resultados, esto debido a que uno experimenta más difracción que el otro, esto debido a la presencia del accidente geográfico de punta Ángeles de Valparaíso. Entre direcciones SW Y WSW se observa un 60% de variación en los resultados de altura de rompiente, y entre SW Y SSW una variación del 54%. Por lo que resulta relevante tener en cuenta que por pequeña que sea la variación de la dirección, en este caso de unos 22.5° existe una variación considerable en el tamaño de la ola que incide en la costa.

Para determinar la ubicación final del arrecife complementando con la metodología realizada por Alday (2014), la zona de rompiente se define mediante la identificación de la ocurrencia de una fracción de oleaje en rotura, donde se estima que ha entrado en rotura un 5% de las ondas de mayor altura correspondiente a los estados de mar transferidos (77,76% de ocurrencias). Se toma en consideración las olas de mayor altura que resultan más atractivas para los surfistas, dado esto se utiliza la fracción de oleaje en rotura asociada a la condición de oleaje de diseño, donde las alturas de ola comienzan a decaer.

Como se observa en el círculo rojo de la Figura 50, existe una concentración de H_s asociado a la condición de oleaje de diseño, de donde se extrae la ocurrencia de $Q_b=0,05$ y es aquí donde se espera que las olas más altas rompan cuando superen la relación de rotura $\gamma = H_b/h$. Cabe destacar que el foco de concentración de energía se acentúa para condiciones de oleaje con mayores periodos

Esta información define el lugar donde se posicionará la estructura que modificará la batimetría del sector.

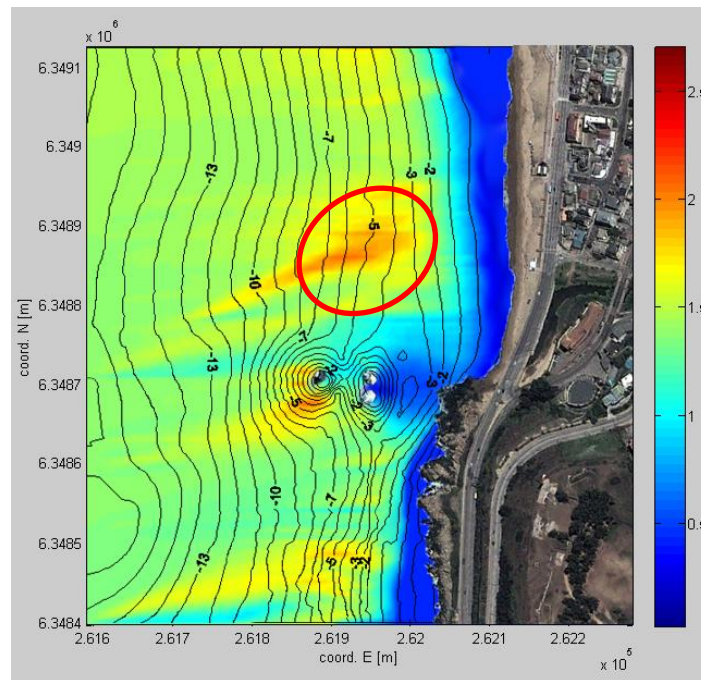


Figura 50: Concentración de energía

Fuente: Elaboración Propia

7 REQUISITOS DE DISEÑO DEL ARRECIFE ARTIFICIAL

El método de diseño preliminar del arrecife artificial está basado principalmente en estudios desarrollados por ASR Limited en Nueva Zelanda. Este método se encuentra publicado en el *Journal of coastal research*, Número 29. El método está basado en los siguientes requerimientos:

- Altura de ola: 1,5 – 4,5 [m]
- Promedio de la altura de ola reinante: 3[m]
- Período de ola: 10 – 16 [s]
- Período de ola reinante: 13 [s]
- Dirección oleaje: 252°- 266°
- Promedio de Dirección oleaje reinante: 259°
- Forma con un brazo de delta para crear ángulo de descrestamiento sólo hacia el norte.
- Dique con un foco pronunciado para crear una zona de despegue central.
- Forma de veril convexa para optimizar la intensidad de la rompiente del oleaje seleccionado
- Intensidad de rompiente: medio a muy alto (Índice de Vortex 3,1 - 1,91)
- Ángulo de descrestamiento: 30°-70°

7.1 DISEÑO DE PERFIL Y PENDIENTE ESTÁNDAR

El dique es diseñado con un perfil convexo, con el fin de optimizar la intensidad de la rompiente del rango de olas seleccionadas. La pendiente real del arrecife artificial resulta difícil de determinar antes de ser analizado mediante un modelo computacional, por lo que los contornos de ésta son aproximados en primera instancia para así obtener un diseño preliminar.

Los contornos de la pendiente son elegidos mediante un análisis de “Pendiente v/s N° de Irribarren”, para diferentes períodos y alturas de ola, con el fin de mantener una rompiente constante dentro del rango de condiciones de oleaje de diseño. El Gráfico 22 muestra la variación que experimenta el número de Irribarren con la altura de ola en rompiente para diferentes pendientes y períodos de oleaje. El promedio de las alturas de rompiente es de 1.52 [m], lo que equivale a un rango de Irribarren de entre 0,51 - 1,63. Se eligió 0,95 como número de Irribarren para el diseño de la rompiente, con el fin de conservar el tipo de rompiente en voluta.

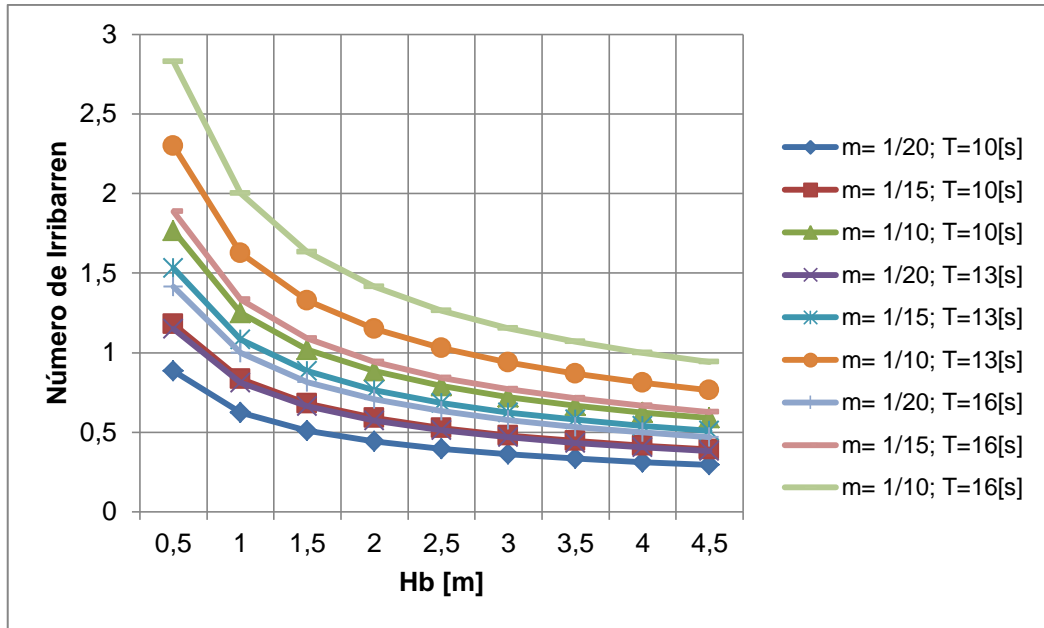


Gráfico 22: Número de Irribarren v/s Altura de ola para diferentes pendientes y períodos.

Fuente: Elaboración Propia

El Gráfico 23 muestra la variación que requiere la pendiente del arrecife para mantener constante el número de Irribarren en 0,95 sobre el rango de diseño de la altura y período del oleaje.

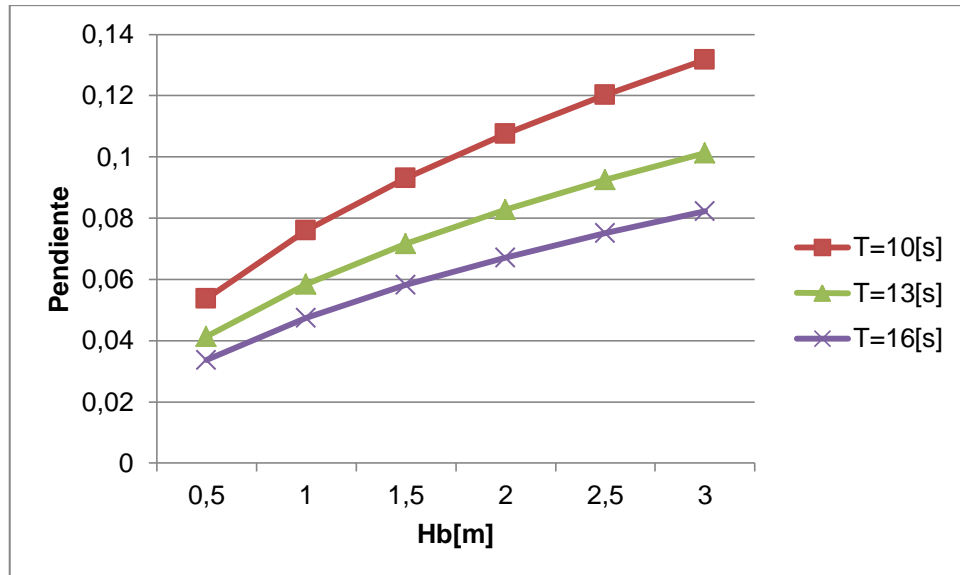


Gráfico 23: Pendiente v/s Altura de rompiente para $I_r = 0,95$

Fuente: Elaboración Propia

La pendiente requerida para el diseño va desde los 0,033 para olas de 0,5[m] hasta 0,13 para olas rompientes de 3 [m].

El diseño inicial de la pendiente para el arrecife artificial varía de 0,14 (1/7) en el pie y de 0,045 (1/22) en la cresta, dejando un fondo de 60 [cm] de profundidad en la cresta. El diseño de perfil convexo es seleccionado para acomodar el diseño de olas de entre 0,5 - 3[m] tanto en promedios de marea baja y alta.

En la sección 7.3 se presenta una figura explicativa del diseño preliminar.

7.2 PROFUNDIDAD DE ROMPIENTE V/S ANÁLISIS DE ALTURA DE OLA EN ROMPIENTE

Se realiza un análisis para estimar la profundidad en cual las olas con variadas alturas, romperán en el arrecife. La estimación de las profundidades de rompiente fueron determinadas con la Figura II-4-2 extraída del Coastal Engineering Manual (CEM). Esta figura fue creada de una investigación de laboratorio de olas monocromáticas, realizado por Weggel (1972). En la Tabla 27 se muestran los rangos de profundidades a los cuales rompe el oleaje con las siguientes pendientes; Pendiente 1: 1/7, Pendiente 2: 1/12, Pendiente 3: 1/17 y Pendiente 4: 1/22.

Tabla 27: Profundidades de Rompientes

Oleaje [m]	Pendiente 1			Pendiente 2			Pendiente 3			Pendiente 4		
	Profundidad			Profundidad			Profundidad			Profundidad		
0,59	0,407	0,404	0,403	0,459	0,456	0,454	0,505	0,501	0,500	0,540	0,537	0,536
1,03	0,721	0,712	0,708	0,812	0,802	0,798	0,892	0,882	0,877	0,954	0,944	0,940
1,08	0,760	0,750	0,746	0,856	0,845	0,840	0,940	0,929	0,924	1,005	0,995	0,990
1,30	0,915	0,901	0,895	1,030	1,015	1,008	1,132	1,116	1,109	1,210	1,194	1,187
1,52	1,080	1,060	1,051	1,215	1,194	1,184	1,333	1,312	1,302	1,425	1,404	1,393
1,77	1,270	1,243	1,230	1,429	1,400	1,386	1,567	1,538	1,524	1,674	1,645	1,631
2,24	1,624	1,580	1,560	1,826	1,779	1,757	2,001	1,953	1,930	2,135	2,088	2,065
2,41	1,761	1,710	1,686	1,980	1,924	1,898	2,169	2,113	2,086	2,313	2,258	2,231
3,33	2,502	2,400	2,352	2,808	2,699	2,648	3,071	2,959	2,907	3,268	3,159	3,108
	Max	2,50		Max	1,43		Max	1,13		Max	0,95	
	Min	1,56		Min	1,18		Min	0,92		Min	0,54	

Fuente: Elaboración Propia

Los valores máximos y mínimos corresponden a los obtenidos de la sección resaltada en amarillo. El análisis de profundidad de la sección del arrecife y estimación de alturas de

rompientes se pueden observar en la Tabla 28. Se eligieron las pendientes más inclinadas para hacer romper las mayores alturas de olas a una mayor profundidad y así lograr tener más recorrido de esta. También se elige de esta forma por motivos constructivos. Finalmente el dique presentará un diseño con pendiente variable, por lo que contará con distintas secciones.

Tabla 28: Análisis de Profundidad de Rompiente

Pendiente de sección del Dique	Profundidad de la sección [m]		Altura estimada de Rompiente [m]	
1/7	1,56	2,50	2,24	3,33
1/12	1,18	1,43	1,52	1,77
1/17	0,92	1,13	1,08	1,30
1/22	0,54	0,95	0,59	1,03

Fuente: Elaboración Propia

7.3 DISEÑO EN PLANTA Y CORTE

Se realiza una elevación 2D del contorno del dique utilizando el software *Autocad 2009*, el diseño cuenta con 4 niveles con diferentes pendientes y con un ala solo hacia el norte, como se observa en la Figura 51, debido a la morfología de la playa, en la cual no es viable generar oleaje rompiente con dirección hacia el sur, pues se encuentra muy próximo a roquerios y desembocadura del estero de Reñaca, además la playa cuenta con un oleaje reinante 259° de incidencia, y para generar un buen ángulo de descrestamiento se requiere de una mayor cambio de ángulo. Luego el diseño fue traspasado a *Global Mapper* donde se trabaja con diferentes dimensiones, inclinación y la ubicación, una vez que se cuenta con un diseño listo para analizar, se exportan los datos como un archivo de grilla XYZ, la que superpuesta con los datos de batimetría real del sector se trabajan a continuación en el software *Surfer*.

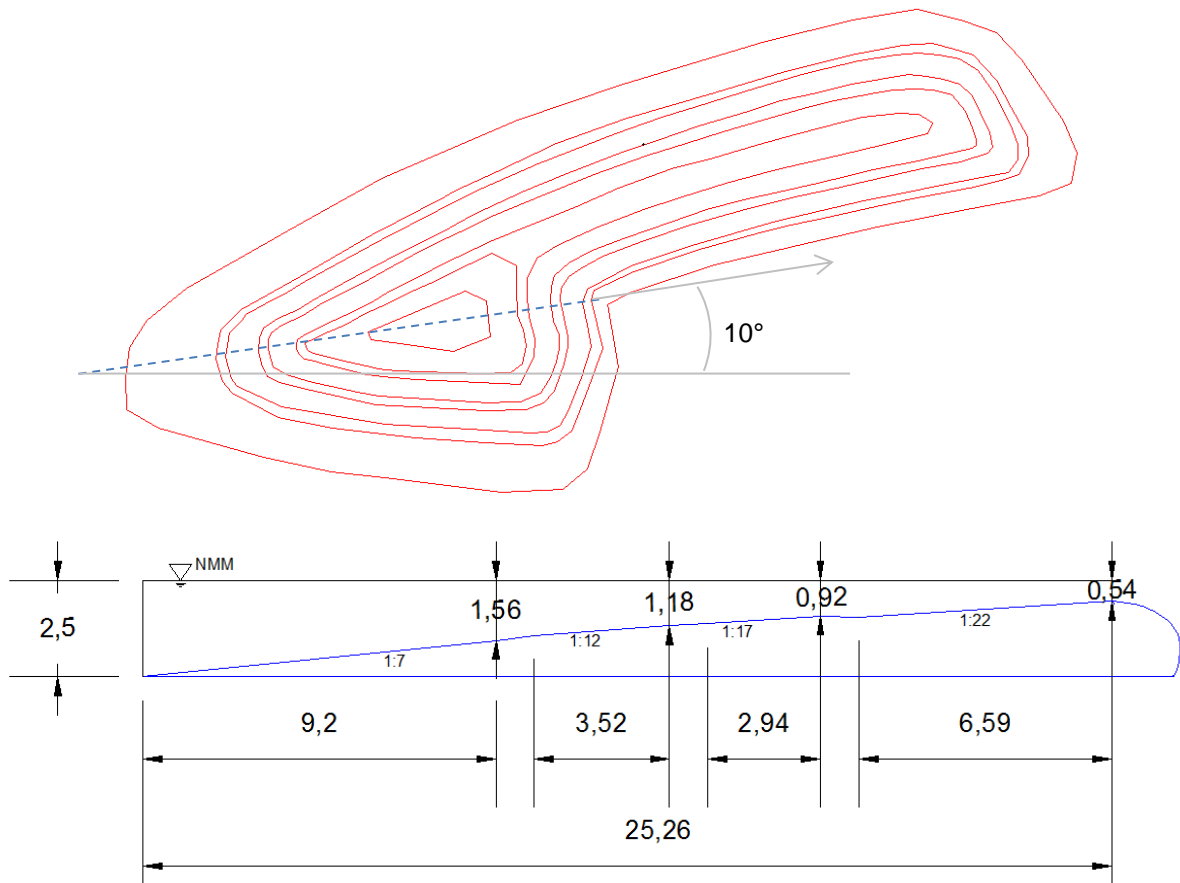


Figura 51: Diseño Preliminar en planta y corte

Fuente: Elaboración Propia

Con el fin de conservar las profundidades de la sección y pendiente para la altura estimadas de rompiente se aplicó una separación de un metro en cada sección. La línea en la imagen superior de la Figura 51 muestra en donde se aplica el corte.

El ala norte tiene una longitud de 102 [m], lo que abarca desde los 9,1 a 4,8 [m] de profundidad, ubicado a unos 137 [m] de la línea de costa, además la estructura presenta una inclinación de 10° con el fin de generar un ángulo de descrestamiento que permita un deslizamiento por la ola.

7.4 MODELACIÓN

A continuación se detalla la modelación aplicada en el sector sur de la playa de Reñaca integrando el diseño base del dique sumergido, la cual es usada con el fin de investigar:

- La respuesta del oleaje ante la estructura, incluyendo asomeramiento, refracción, difracción y rompiente y obtener parámetros usados para la clasificación de la surfeabilidad de la obra.
- Respuesta de la playa durante condiciones extremas.

Debido a la complejidad de los procesos naturales, todos los modelos numéricos envuelven aproximaciones y suavizaciones tanto en tiempo como en espacio. Los modelos más avanzados contienen coeficientes o parámetros adicionales, lo que consecuentemente agrega mayor incertidumbre, una potencial inestabilidad, mayor lentitud al correr el programa, y sin una buena comparación con las mediciones entregará resultados de incertidumbre desconocida.

La Figura 52 muestra la batimetría del sector con la obra implementada.

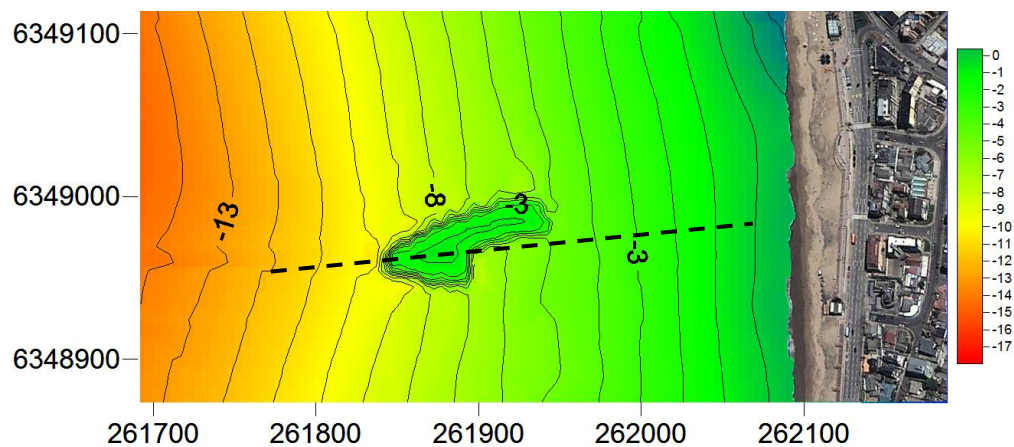


Figura 52: Batimetría del sector con dique

Fuente: Elaboración Propia

Se analizaron los 9 casos seleccionados en la sección 6.1, y en sus resultados se logra apreciar una nueva zona de rompiente, la que genera una sombra de oleaje de menor altura, es decir, una zona de mayor calma volviendo a romper de manera más pequeña más cercano a la costa.

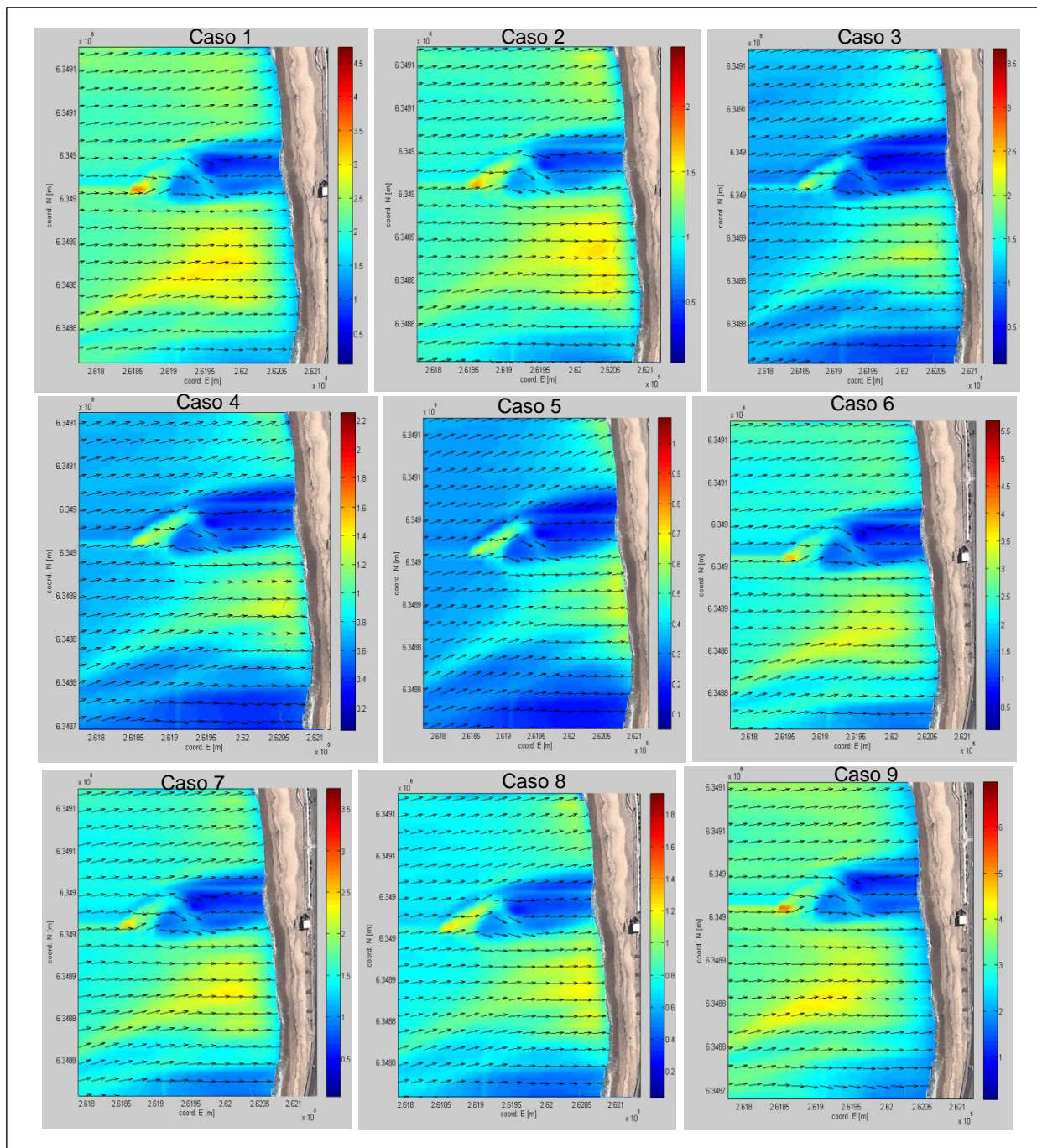


Figura 53: Implementación de dique para los 9 casos. Leyenda en metros.

Fuente: Elaboración Propia

Se observa que a medida que aumenta la altura de ola, existe un comportamiento regular de la obra ante ésta, ya que el peak que ésta presenta, siempre es en el mismo punto para el

cual se diseñó, siendo éste el punto de despegue, donde comienza el recorrido surfeable de la ola, continuando a lo largo del ala de la estructura.

Al variar la dirección del oleaje, siendo más proveniente del Oeste, la sombra generada por el dique se ve disminuida en unos metros.

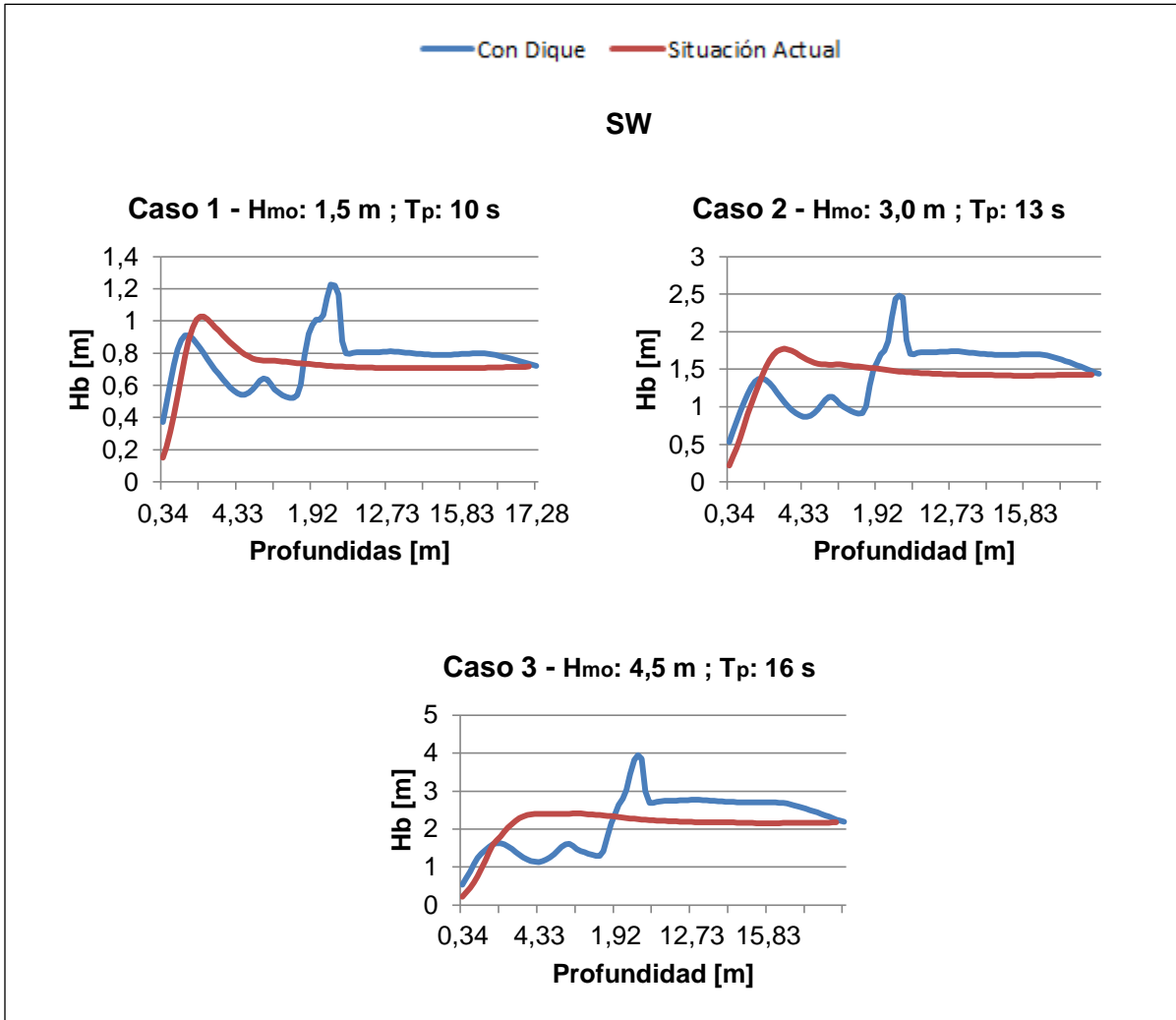


Gráfico 24: Respuesta del oleaje ante el dique y comparación sin la presencia de éste. Casos 1, 2 y 3

Fuente: Elaboración Propia

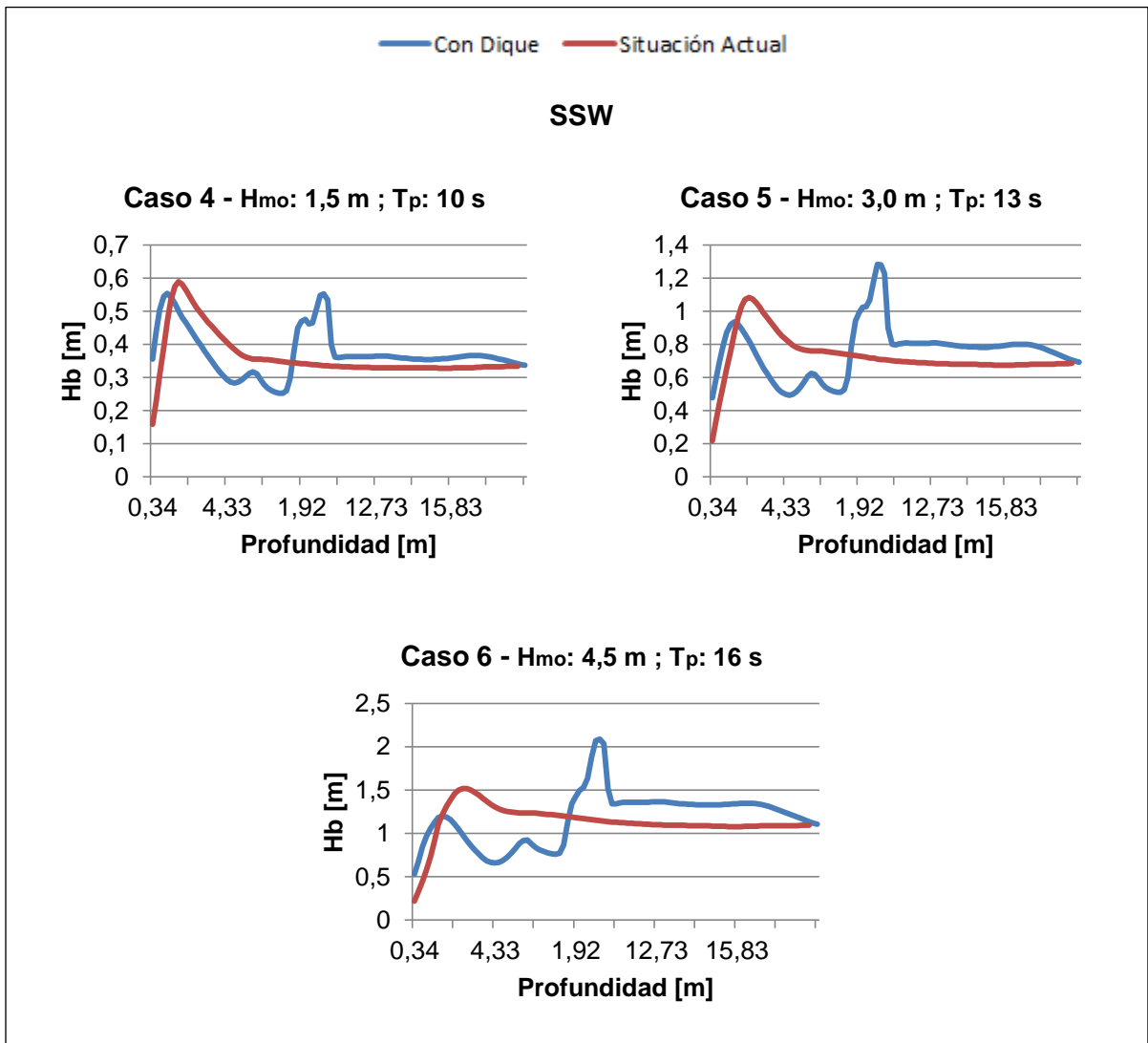


Gráfico 25: Respuesta del oleaje ante el dique y comparación sin la presencia de éste. Casos 4, 5 y 6

Fuente: Elaboración Propia

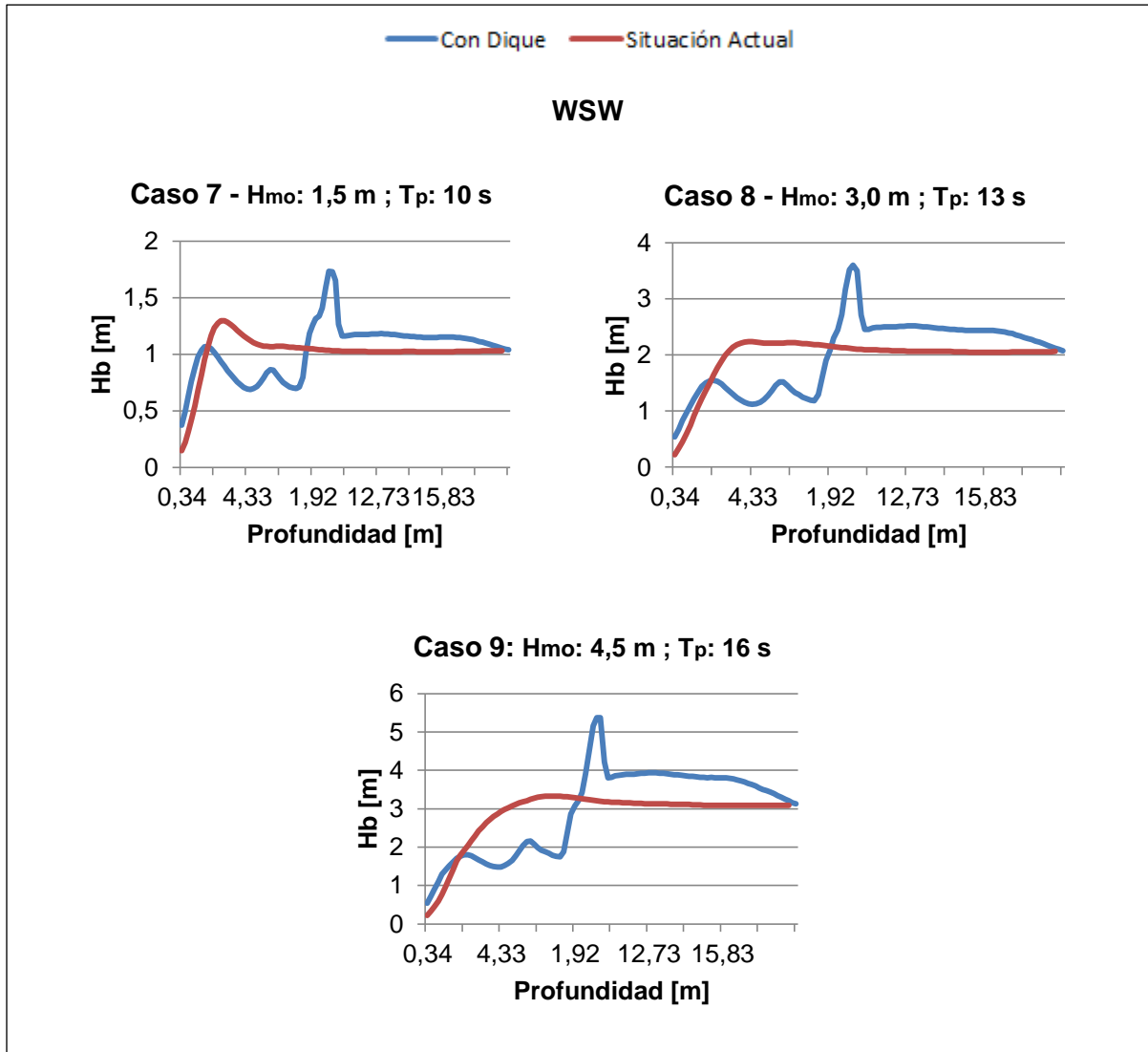


Gráfico 26: Respuesta de oleaje ante el dique y comparación sin la presencia de éste. Casos 7, 8 y 9.

Fuente: Elaboración Propia

Los Gráfico 24, Gráfico 25 Gráfico 26 muestran el comportamiento del oleaje a lo largo de la sección representada por la línea discontinua en la Figura 52. Se aprecia que originalmente el oleaje comienza a romper con mayor intensidad a unos 100 [m] de la línea de costa aproximadamente para los casos más frecuentes, para otros como el caso 9 comienza a romper a unos 250 [m] de la costa, como se logra apreciar en el Gráfico 27.

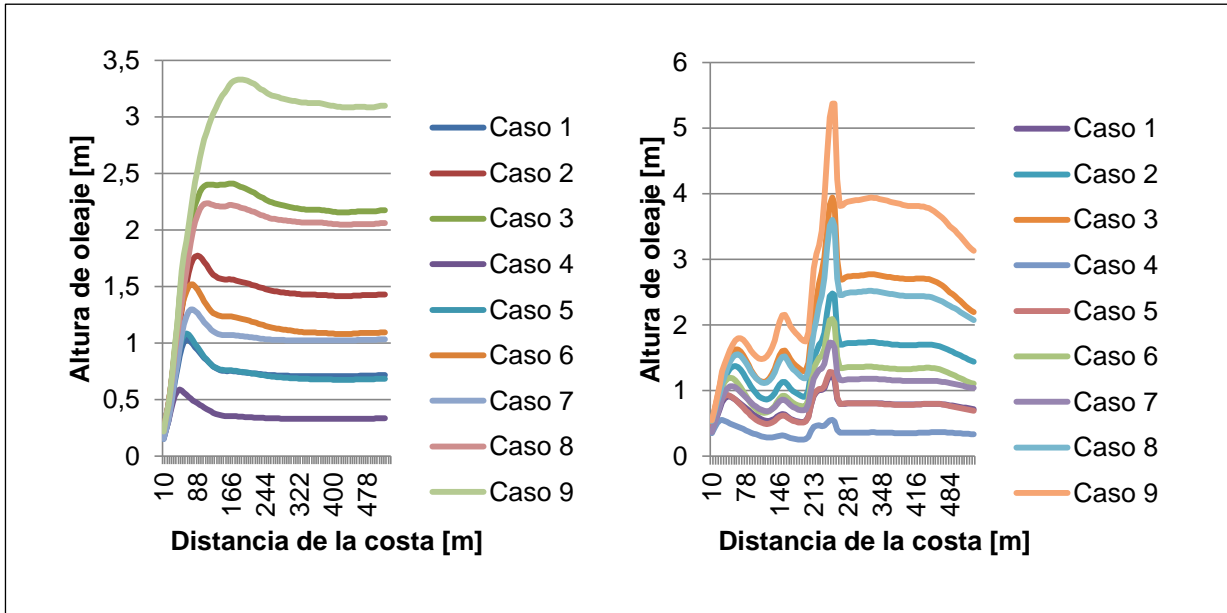


Gráfico 27: Comparación de Oleaje ante estructura. Condiciones normales (izq.) y con estructura implementada (der.)

Fuente: Elaboración Propia

Además se determina que el oleaje vuelve a romper más cercano a la costa pero con un porcentaje promedio de un 59% de la altura original. Para el caso 9 se observa una reducción de un 67% y el caso 4 se mantiene solo reduciendo un 2%.

El hecho de que con la implementación del dique el oleaje tenga una triple rompiente, indica que se debe modificar la ubicación de este con el fin de eliminar una de estas, esto se logra mediante el acercamiento de la obra a la costa, considerando aun el área donde se concentra mayor rotura de oleaje.

Por otro lado de la Figura 53 se establece que al sur del dique implementado, existe aún una zona desprotegida de los embates del oleaje, la cual debe ser atendida.

7.5 MODIFICACIONES DE DISEÑO

7.5.1 Modelación

Debido al método que se utilizó en el diseño, las profundidades que alcanza el dique no pueden ser modificadas, ya que esto cambiaría la configuración de las rompientes para la que fue diseñado por lo que se determinó estudiar el sector con un segundo dique ubicado más al sur en la zona que se encuentra más desprotegida.

La segunda modificación al diseño corresponde al reubicarlo más hacia la costa con el fin de eliminar una de las rompientes que se generaban cercanas a la línea de costa. Esta reubicación también reduce el costo de implementación de cada obra ya que se requerirá menos relleno para alcanzar las profundidades diseñadas.

Las nuevas estructuras son reubicadas 45[m] costa afuera más que el diseño anterior, la segundo dique se ubica a unos 85 [m] hacia el sur del original (distancia entre puntos de despegue) con el fin que no se afecte el uno al otro en cuando a la generación del oleaje de despegue y propagación de este.

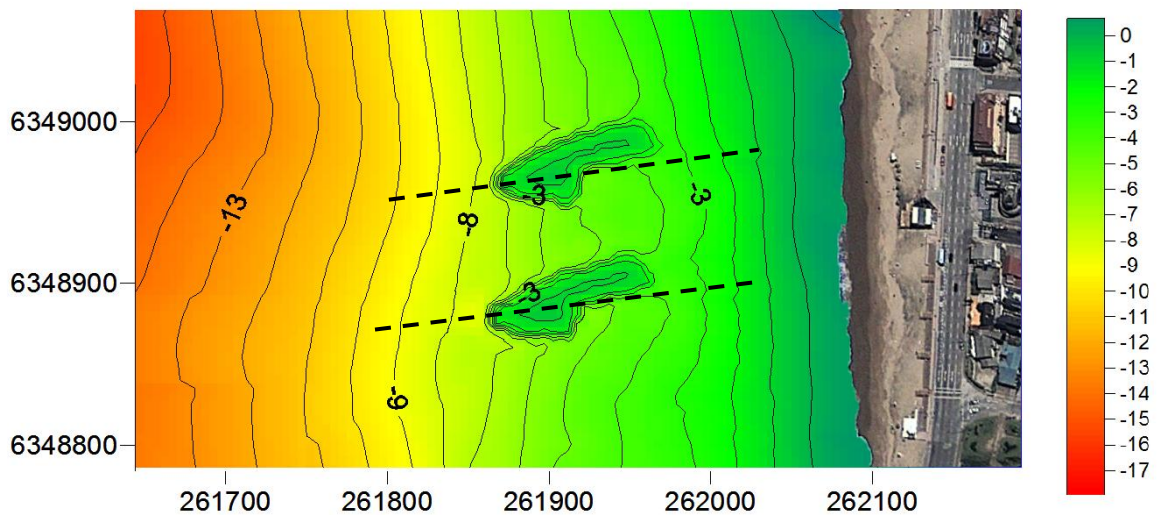


Figura 54: Batimetría con la implementación de dos diques sumergidos

Fuente: Elaboración Propia

La Figura 54 muestra las dos obras integradas en la batimetría del sector, estas cuentan con el mismo diseño original modificando sólo su ubicación.

Al igual que en el diseño anterior, se analizaron los 9 casos seleccionados en la sección 6.1.

Se observa en la Figura 55 que ambos diques inician el rompimiento de la ola en el punto de despegue diseñado generando una “sombra” hacia la costa con un tamaño menor de ola. También se observa que entre los diques se mantiene el oleaje original del sector lo que generaría erosión entre las salientes producidas por cada dique.

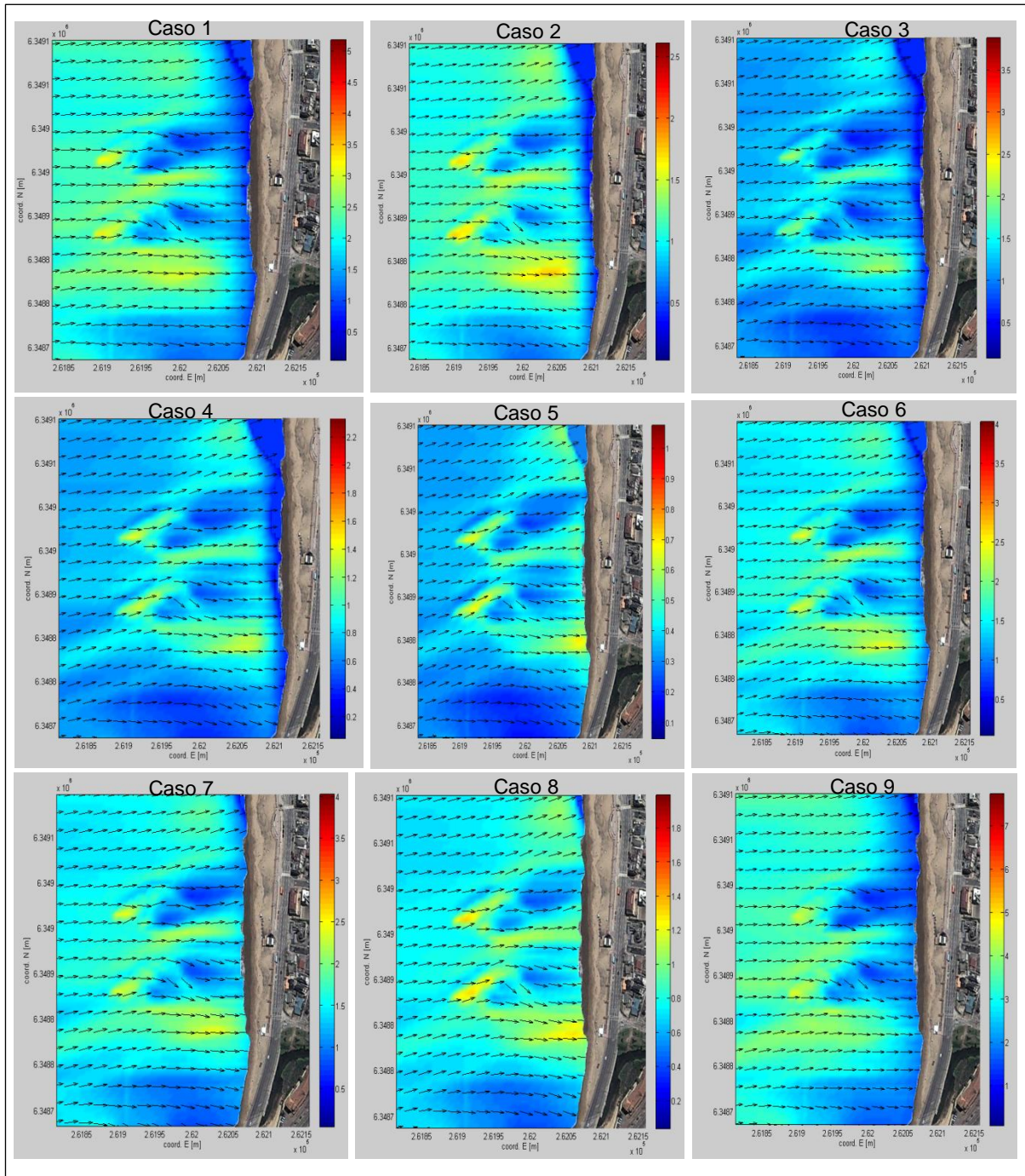


Figura 55: Resultado de modelación con dos estructuras. Leyenda en metros.

Fuente: Elaboración Propia

Al sur de la nueva estructura se mantiene la altura del oleaje, punto que no resulta tan relevante de proteger ya que es donde desemboca el estero de Reñaca.

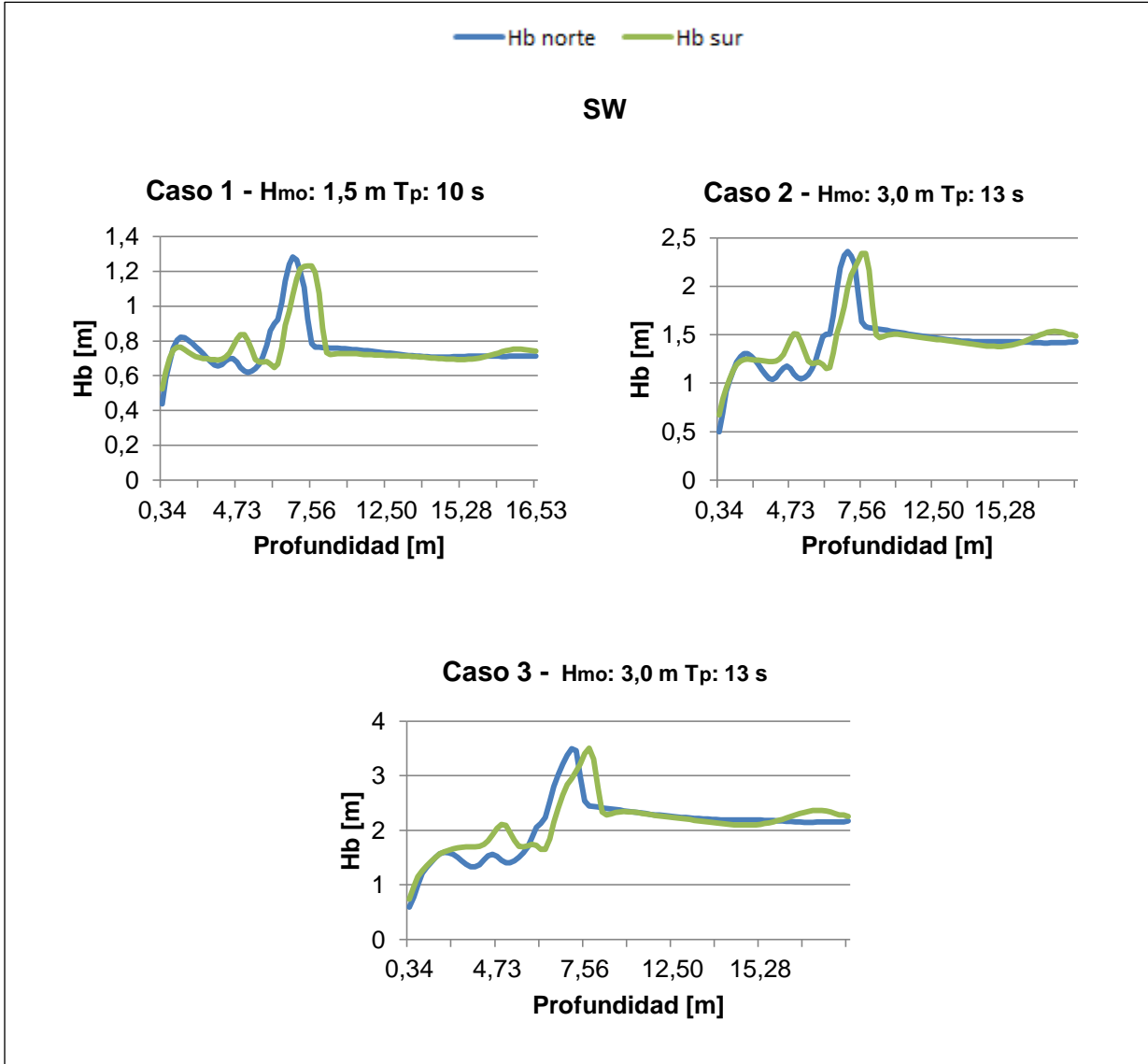


Gráfico 28: Respuesta del oleaje ante dique norte y sur. Casos 1, 2 y 3

Fuente: Elaboración Propia

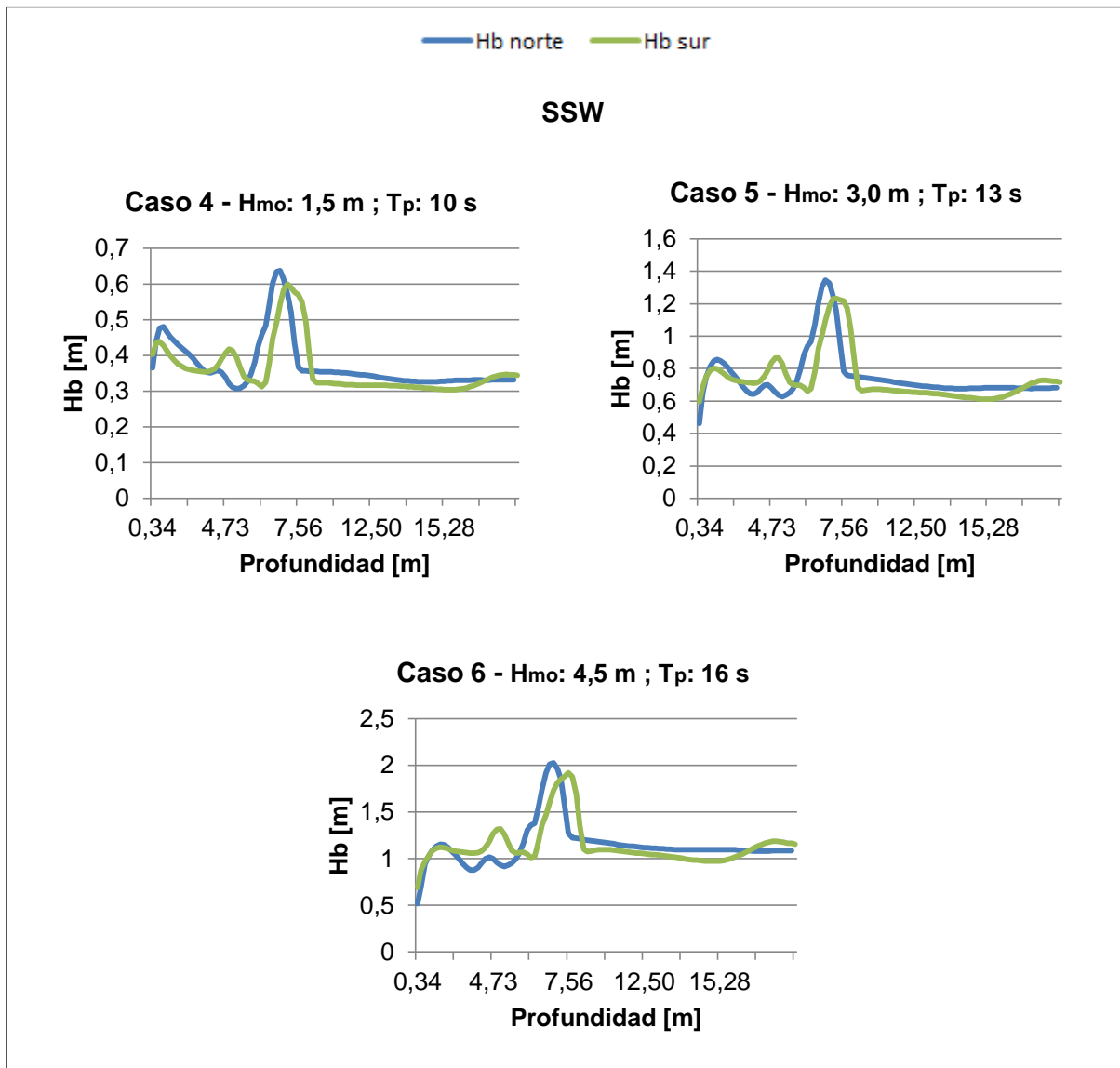


Gráfico 29: Respuesta del oleaje ante dique norte y sur. Casos 4, 5 y 6.

Fuente: Elaboración Propia

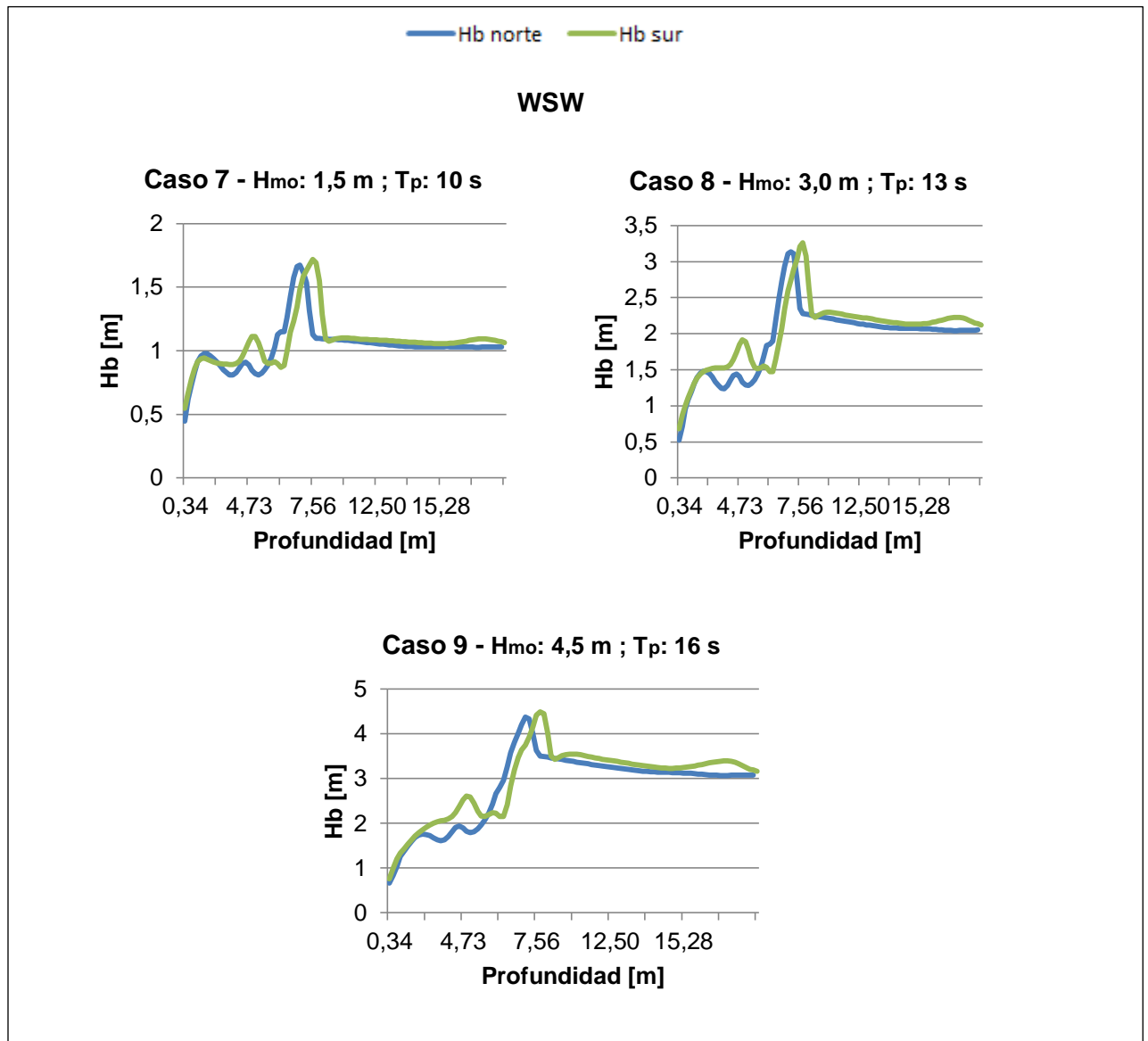


Gráfico 30: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 7, 8 y 9

Fuente: Elaboración Propia

Se desprende de los Gráfico 28, Gráfico 29 y Gráfico 30, que para todos los casos, la ola comienza a romper en primer lugar, en la estructura ubicada al sur, lo que indica un inicio de despegue más anticipado, ideal para el surfista.

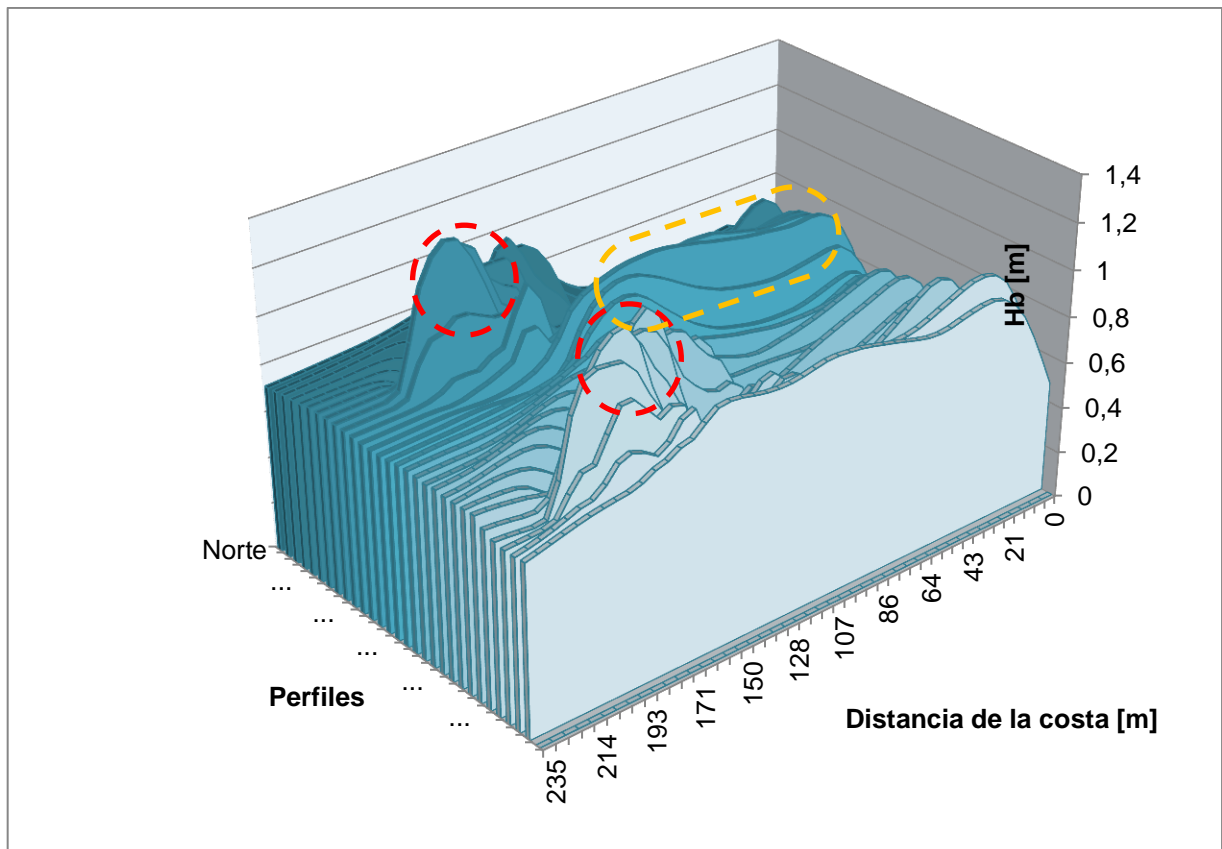


Gráfico 31: Perfil de oleaje con diques

Fuente: Elaboración Propia

Al analizar el Caso 1, se observa en el Gráfico 31 que los peaks señalados en rojo inician el oleaje en rompiente, avanzando hacia el norte. Lo destacado en amarillo muestra el oleaje que queda sin protección entre los diques desarrollándose hacia la costa con un mayor tamaño. El oleaje ubicado más al sur, se muestra con un aumento de su tamaño mucho más cercano a la costa.

7.5.2 Ángulo de Descrestamiento

En el diseño preliminar se definió un rango para el ángulo de descrestamiento de $30^\circ - 70^\circ$. Al analizar el ala del dique, se obtiene que la estructura norte, presenta ángulos de incidencia de $247^\circ - 270^\circ$ con un promedio de 262° y un ángulo de despegue de $264,7^\circ$. Lo que llevado a ángulo de descrestamiento corresponde a un rango de $67^\circ - 90^\circ$ y un despegue de $84,7^\circ$, esto corresponde a un rompimiento muy cercano a "close-out".

La estructura ubicada más al sur muestra un rango en su ala de $73^\circ - 90^\circ$ con un promedio de 83° y un ángulo de despegue de $87,8^\circ$, al igual que la estructura norte corresponde a un

ángulo en el cual la ola romperá de forma “close out”. Estos ángulos tan altos corresponden a las clases más bajas de surfista como principiantes y aprendiz (José M. de la Peña Olivas, 2003).

Se debe implementar un mayor ángulo en el ala de la estructura con el fin de obtener un mejor ángulo de descrestamiento.

7.5.3 Diseño Final

Se le realizaron nuevas modificaciones al diseño del dique, en base a los resultados obtenidos en las modelaciones. La sección 7.5.2 mostro un ángulo poco eficiente como resultado. Para esto se modificó el ángulo del ala del dique para las dos estructuras. Inicialmente contaba con un ángulo de 15° de inclinación, la que se aumentó a 45° como se muestra se muestra en la Figura 56. El ala alcanza una longitud de 92 [m] y el ancho paralelo a la costa rodea los 69 [m]. Las pendientes y largos de la sección se mantienen como en la Figura 51, ya que estos determinaran la altura de ola en rompiente para distintos casos.

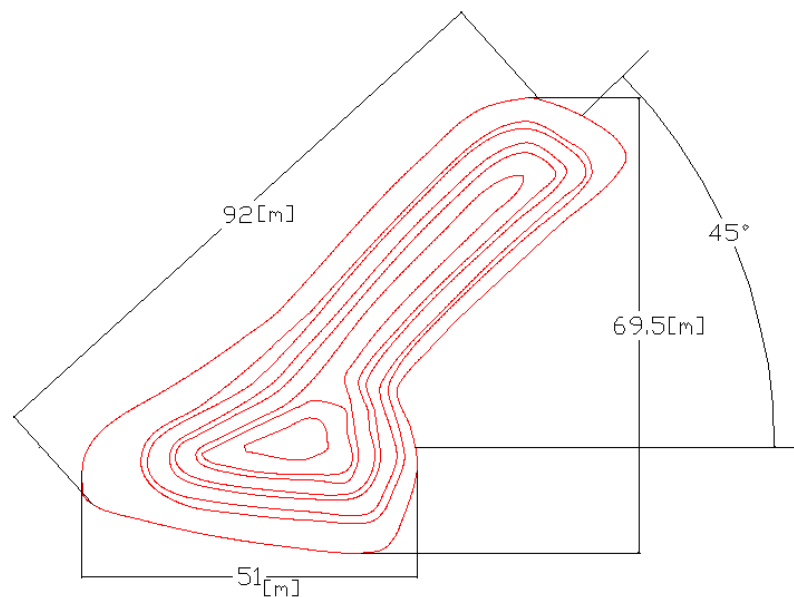


Figura 56: Dimensiones del diseño final.

Fuente: Elaboración Propia

La Figura 57 muestra cómo queda la batimetría del sector con el diseño final aplicado a la playa de Reñaca.

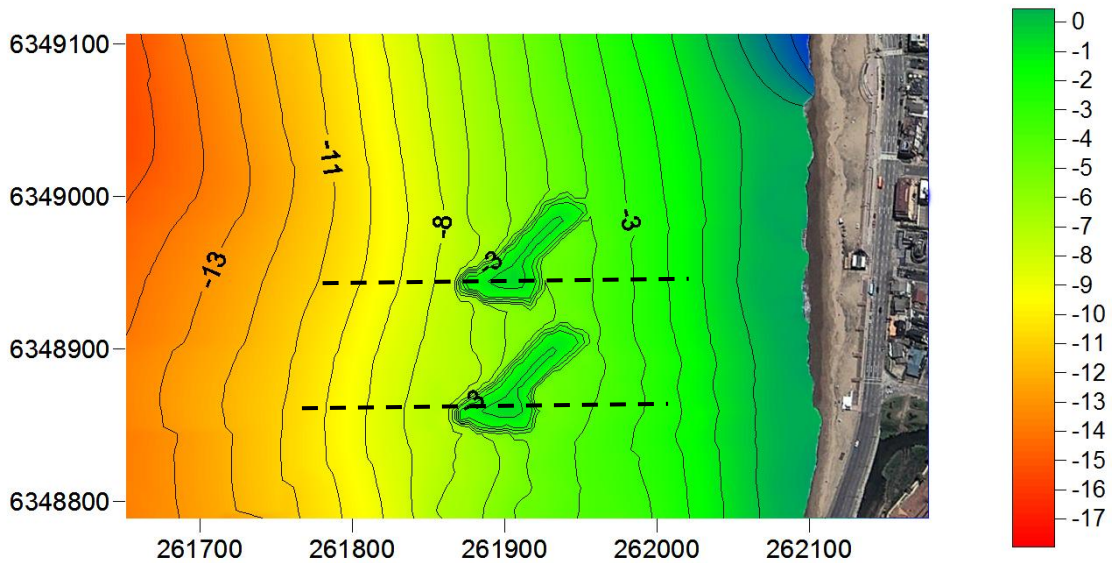


Figura 57: Batimetría de diseño final

Fuente: Elaboración Propia

Al modelar los casos seleccionados y analizar las secciones que se encuentran destacadas por la línea discontinua en la Figura 57 se obtiene el Gráfico 32, Gráfico 33 y Gráfico 34 de los cuales se puede apreciar que existe un peak en la altura de ola al momento de pasar por la zona más alta del dique, la zona de despegue para los surfista. Debido a que el oleaje en todos los casos viene más inclinado desde el sur, y no directamente del oeste, el dique sur, experimenta de forma anticipada el peak del oleaje.

Existe un segundo aumento en el tamaño de la ola más cerca de la costa, siendo en promedio un 25,5% menor que el peak experimentado en la zona de despegue para la obra norte, y para la sur un 26,78% menos que el peak inicial.

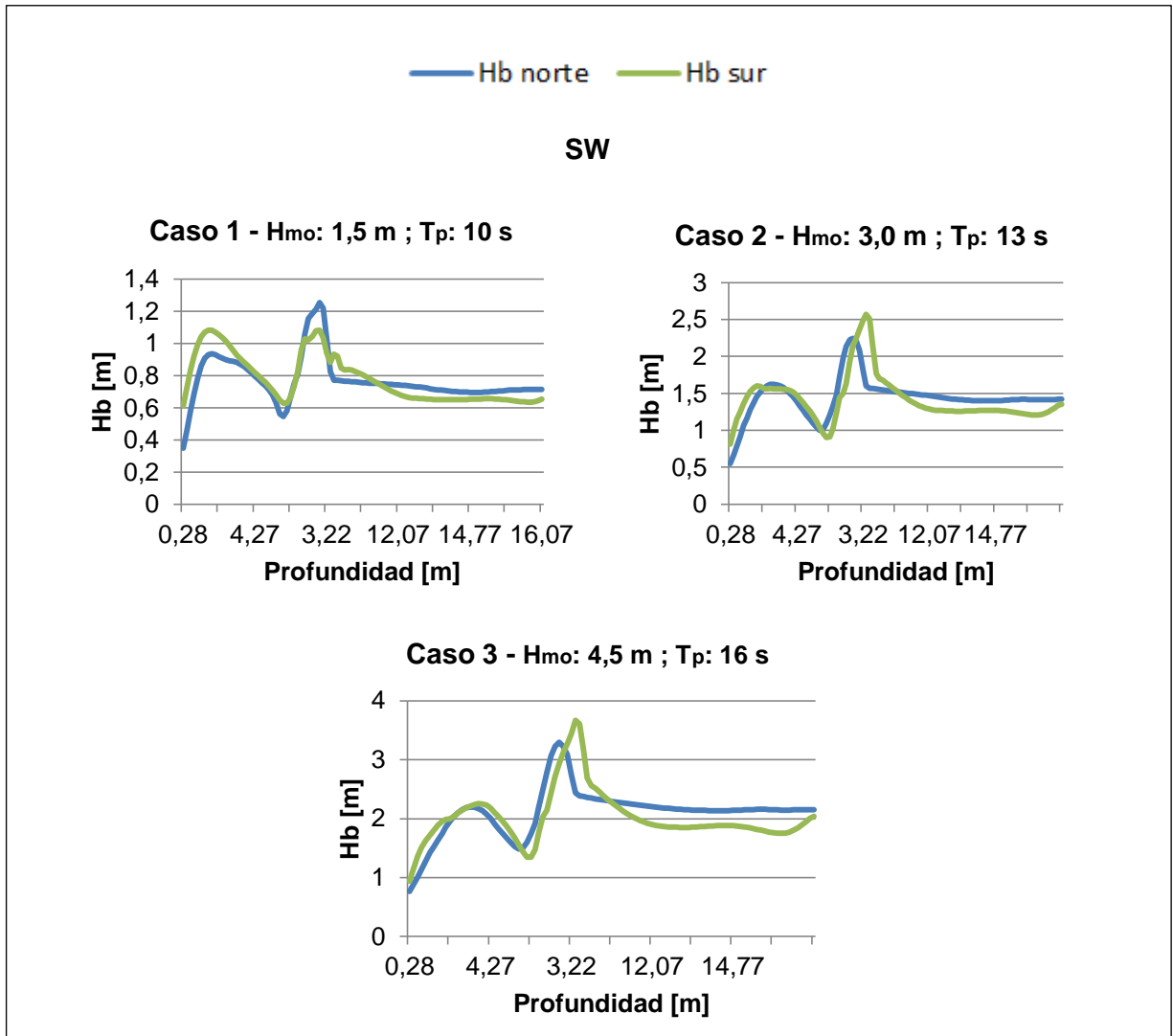


Gráfico 32: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 1, 2 y 3.

Fuente: Elaboración Propia

Se observa además que para los casos con altura de ola más grandes (casos 3, 6 y 9) existe una mayor disminución de un peak a otro siendo esto en promedio de 32,7 % para el dique norte y una disminución de un 36,7% para el dique sur.

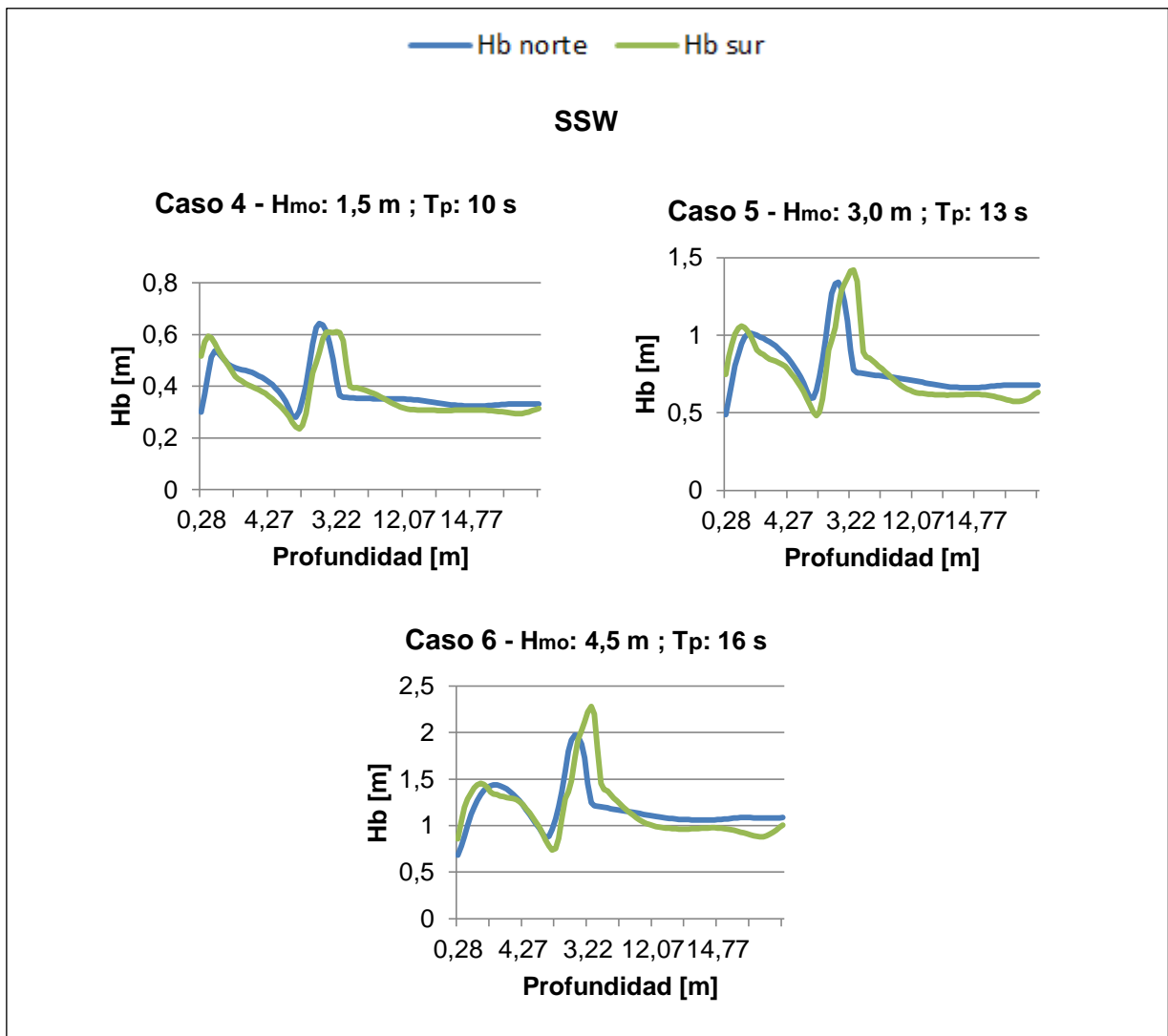


Gráfico 33: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 4, 5 y 6

Fuente: Elaboración Propia.

Para los casos 1,4 y 7 que cuentan con olas de menor tamaño, el dique norte presentó un 21% de disminución de un peak a otro y el dique sur tan solo un 9,2%.

Se desprende que para casos más extremos existe una buena disipación de energía por parte de las estructuras propuestas.

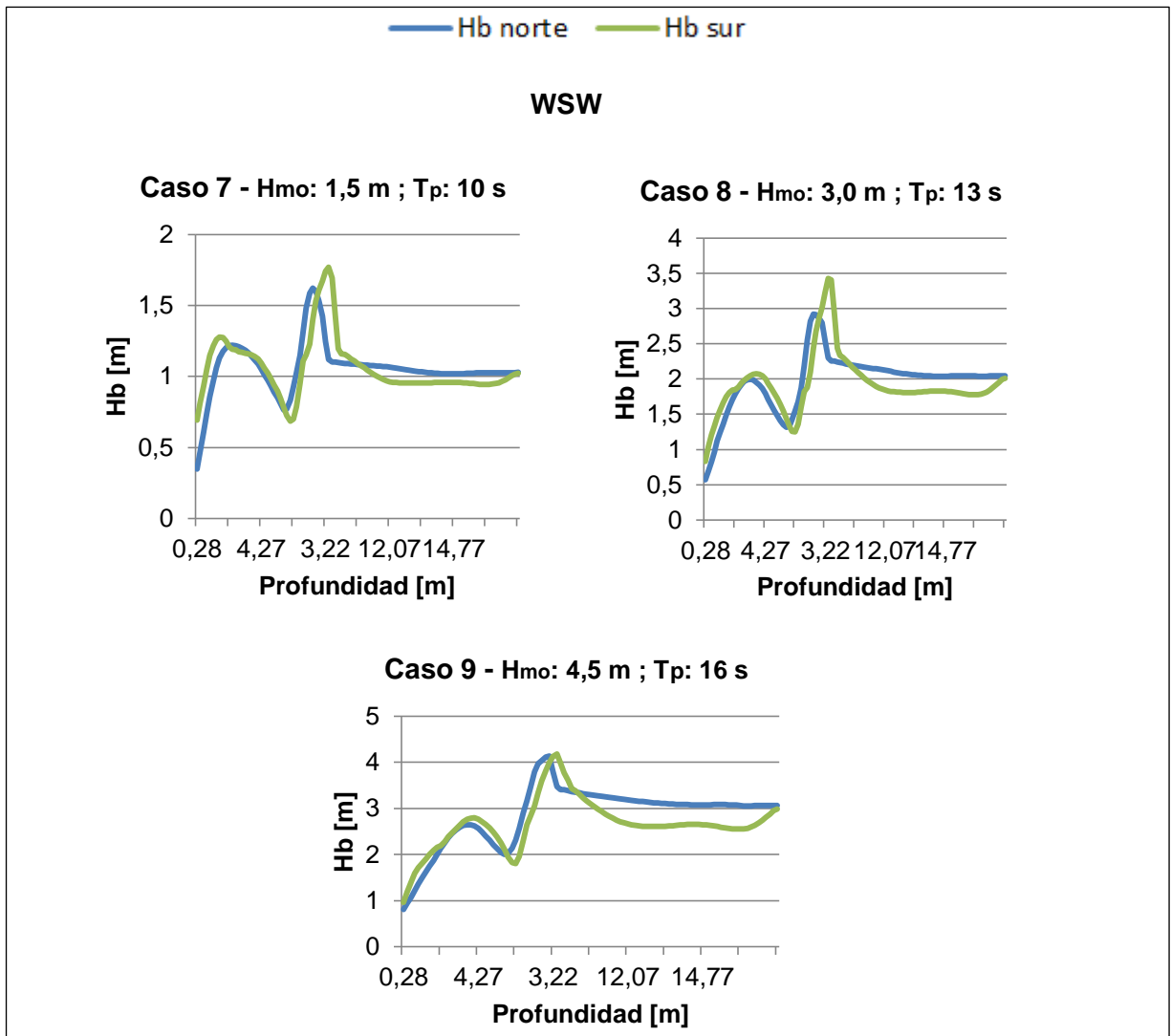


Gráfico 34: Respuesta del oleaje ante el dique norte y sur. Casos 7, 8 y 9
 Fuente: Elaboración propia

Al observar de forma general la modelación realizada en el sector (Figura 58), se aprecia una evidente sombra que generan ambas estructuras, siendo más pronunciada en la zona extrema del ala ya que ahí existe una menor distancia entre la estructura y la costa por lo que el oleaje no alcanza a aumentar su tamaño como ocurre unos metros más hacia la costas desde el punto de despegue.

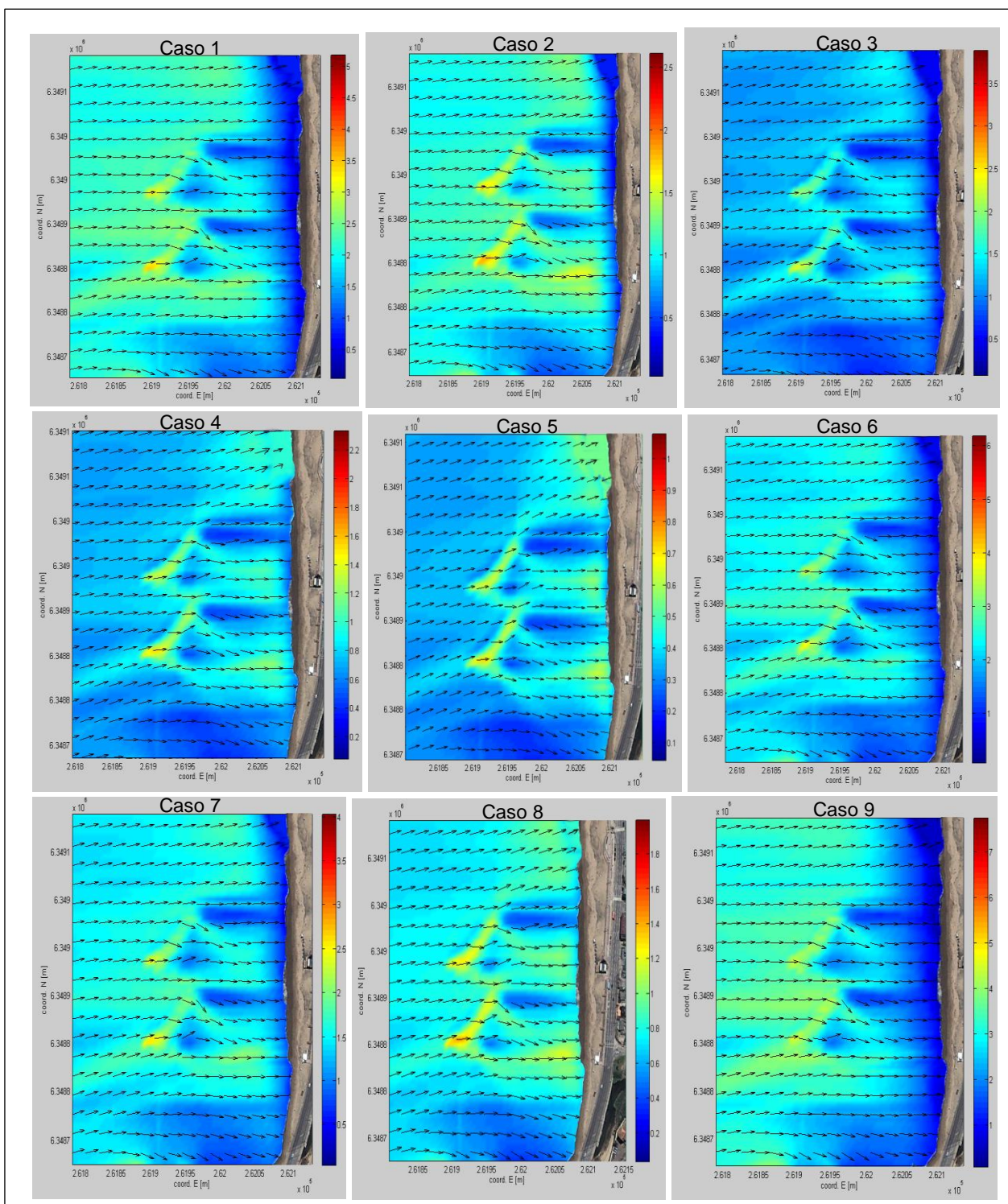


Figura 58: Modelación de Casos con diseño final. Leyenda en metros.

Fuente: Elaboración Propia

Con la implementación de un ángulo mayor en ambas alas, al hacer un análisis de perfiles se observan los peaks de oleaje se van dando de forma continua hacia el norte en ambas estructuras como lo señalan las flechas rojas en el Gráfico 35 que representa el Caso 1.

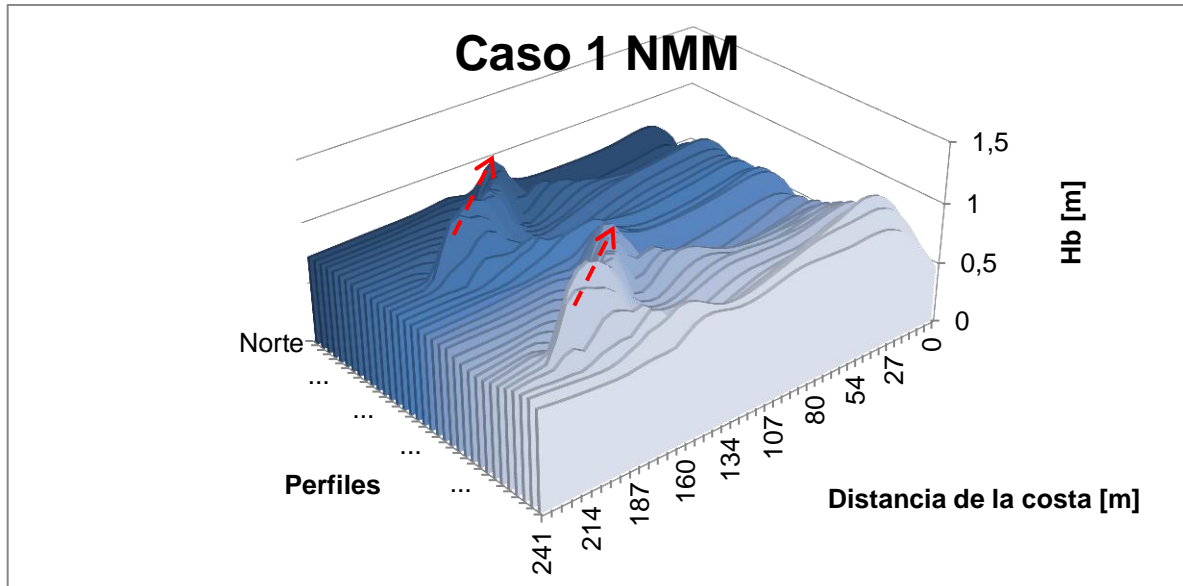


Gráfico 35: Análisis de perfiles para Caso 1 NMM

Fuente: Elaboración Propia

Los gráficos de los casos restantes se pueden encontrar en la sección 11.2 del Anexo donde se podrán observar las distintas reacciones que tiene el oleaje frente a las estructuras.

De la Tabla 29 se desprende un rango de descrestamiento de los 37° a los 52° lo que se encuentra dentro del rango de diseño. Existe un promedio de $47,49^\circ$ para la estructura norte y un $44,45^\circ$ para la sur. Al mantener la altura y el periodo se observa que aumenta el ángulo de descrestamiento a medida que el oleaje se “carga” más hacia el oeste y se enfrenta de forma más paralela a la costa.

Tabla 29: Ángulos de descrestamiento de las estructuras (NMM)

Caso	Peel Angle [°]	
	Norte	Sur
1	43,58	43,14
2	52,49	45,77
3	50,64	46,63
4	43,61	37,26
5	43,58	43,14
6	50,36	45,93
7	50,36	45,03
8	43,31	42,44
9	49,5	50,74

Fuente: Elaboración Propia

Debido a que el promedio del NMM se considera como el 50% del ciclo mareal, hace relevante un análisis del 50% restante, que corresponde a un 25% del promedio de bajas más bajas y otro 25% al promedio de pleas más altas.

El comportamiento de la estructura para este 50% restante se puede apreciar en la Figura 59

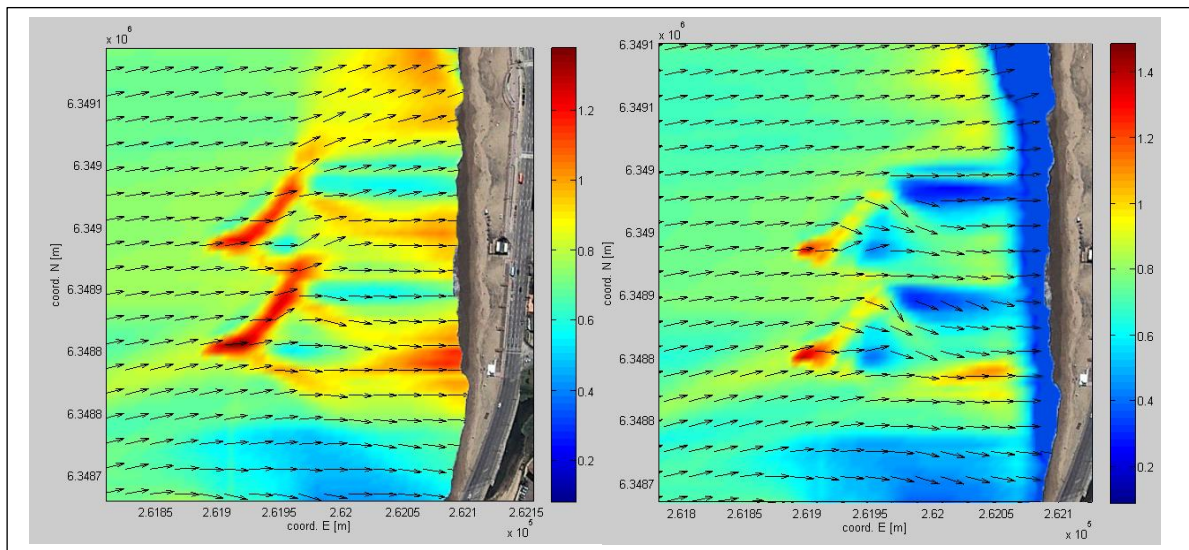


Figura 59: Modelación de Caso 1 con promedio de Pleas (izq.) y con promedio de Bajas (der.)

Fuente: Elaboración Propia

La modelación con el promedio de mareas altas refleja que existe un mayor aumento en el tamaño de la ola a lo largo del ala de la estructura, al contrario que con el promedio de bajas que se observa un peak solo en la zona de despegue y que la dirección del oleaje se inclina

más hacia el sur, lo que puede perjudicar el funcionamiento. Las sombras generadas por la estructura son prácticamente las mismas, solo que con diferentes tamaños de olas.

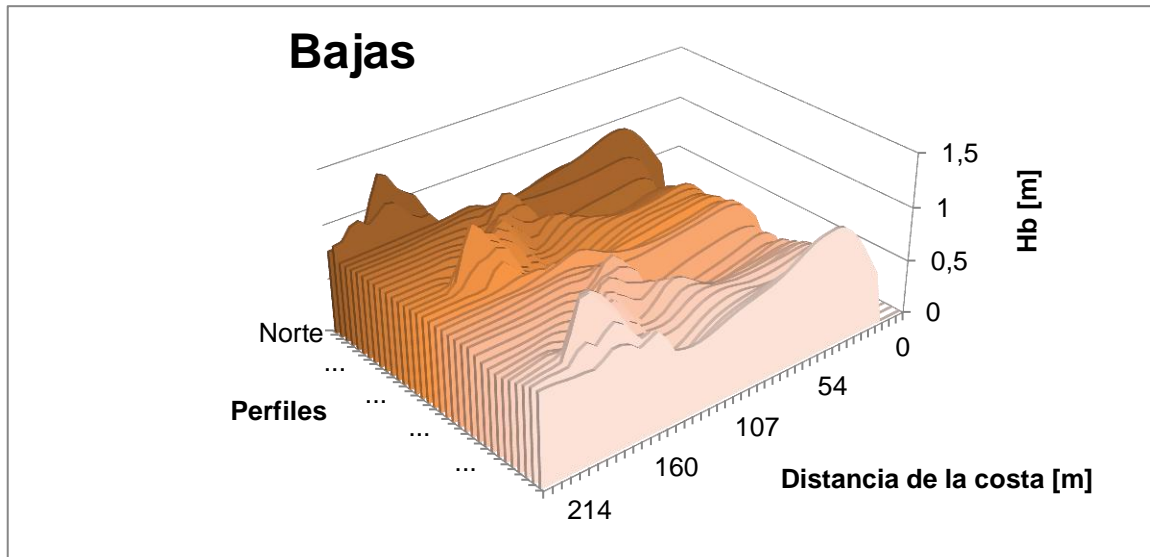


Gráfico 36: Análisis de perfiles con promedio de bajas.

Fuente: Elaboración Propia

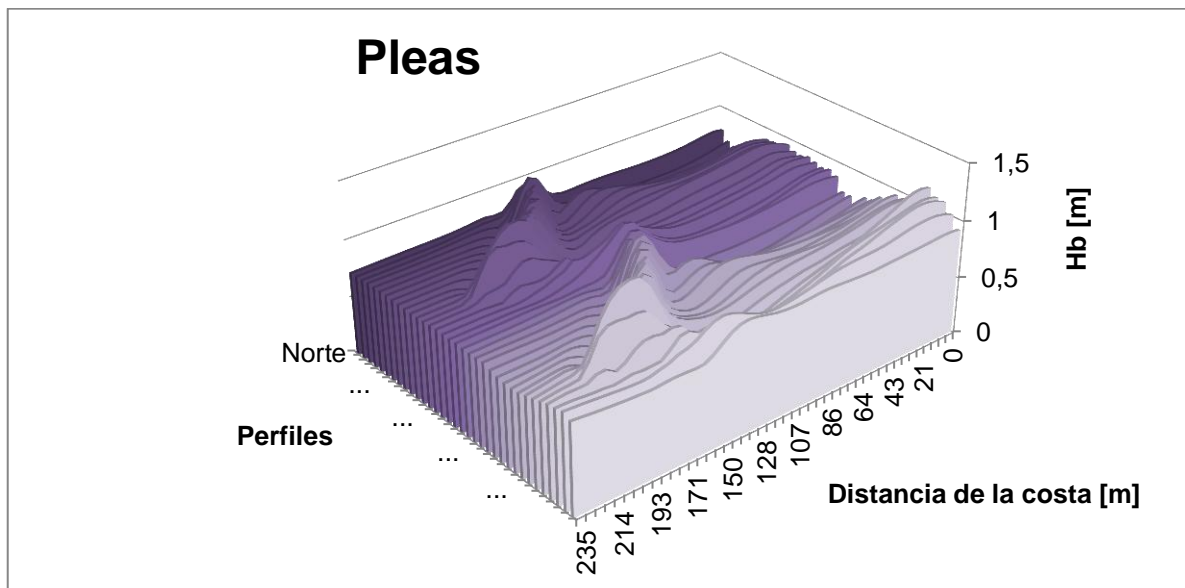


Gráfico 37: Análisis de perfiles con promedio de pleas.

Tanto en el Gráfico 36 como en el Gráfico 37 se aprecian los peaks del oleaje siendo de mayor tamaño cuando la marea es baja debido a que existe menor columna de agua entre la zona de despegue y la ola haciendo que esta aumente su peak. La segunda rompiente de

menor tamaño, se genera antes cuando la marea es baja, y unos metros más hacia adelante, cuando se está en marea alta.

Con respecto al ángulo de descrestamiento que generan estos distintos niveles, se aprecia en la Tabla 30 que el rango para la baja, va de los 45° a los 53° en ambos diques, sólo con pequeñas variaciones en los decimales. En estado de plea se tiene un rango de entre los 34° y 50°. Este último rango, tiene valores menores que indican un ángulo más cerrado de descrestamiento y que existe mayor interacción con la obra, pues el oleaje siente de forma más inesperada el fondo, al contrario de cuando existe marea baja, que el oleaje ya posee una interacción anticipada con el fondo.

Al variar la dirección y mantener la altura y periodo, en la marea alta se observa un aumento en el ángulo a medida que la procedencia del oleaje tiende más hacia el oeste. Cuando existe marea baja solo la estructura norte mantiene este comportamiento.

Tabla 30: Ángulos de descrestamiento con marea baja y alta

Caso	Peel Angle [°]			
	\bar{X} Bajas		\bar{X} Pleas	
	Norte	Sur	Norte	Sur
1	53,33	51,19	42,36	34,94
2	47,20	45,40	42,36	40,26
3	52,72	53,04	44,02	43,21
4	45,19	46,42	43,71	34,93
5	53,47	45,77	42,53	37,68
6	52,64	47,19	43,21	39,82
7	48,00	47,44	42,19	37,68
8	48,23	46,04	43,14	41,77
9	49,67	51,30	50,36	49,44

Fuente: Elaboración Propia

Para los 9 casos, el ángulo de descrestamiento se mantiene dentro del rango de diseño, por lo que se determina como aceptable para la implementación. Estos rangos de ángulos determinan un surfista de clase 5 y 6 (Hutt, 2001) el cual puede ejecutar maniobras típicas consecutivamente en una ola simple y maniobras avanzadas en ocasiones.

Las figuras y gráficos de las modelaciones de los casos restantes tanto para marea baja y alta se encuentran en la sección 11.2 del Anexo.

7.5.3.1 Análisis con Clima Extremo

Resulta Relevante conocer el comportamiento de la estructura al momento de experimentar condiciones extremas con periodos de retorno del orden de los años. Como se mencionó en

la sección 5.3.2, la procedencia del oleaje tiende a ser desde el norte, por lo que se analizó en promedio desde el NW (315°) y un periodo de 14 [s]. Con los distintos años de retorno se va variando la altura de ola llegando al extremo de los 100 años con unos 8,56[m].

Para el periodo de retorno de dos años, donde la altura de ola equivale a 7,21 [m], se aprecia en la Figura 60 y Gráfico 38 que las estructuras generan un leve impacto en el oleaje pues este continua con un gran tamaño después de sobrepasarlas. Aun así existe un peak en la zona de mayor altura del dique pero no resulta tan relevante para el tamaño de ola.

Para los casos restantes de periodo de retorno donde la altura de ola aumenta, el comportamiento resulta parecido ya que debido al tamaño de la ola, las estructuras bajo el agua resultan cada vez menos relevantes y es sobrepasada con creces.

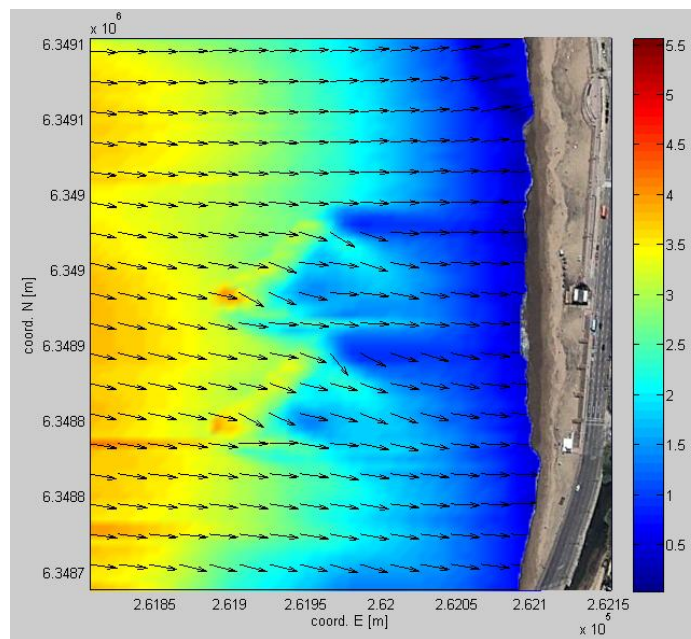


Figura 60: Modelación de Clima Extremo Tr 2

Fuente: Elaboración Propia

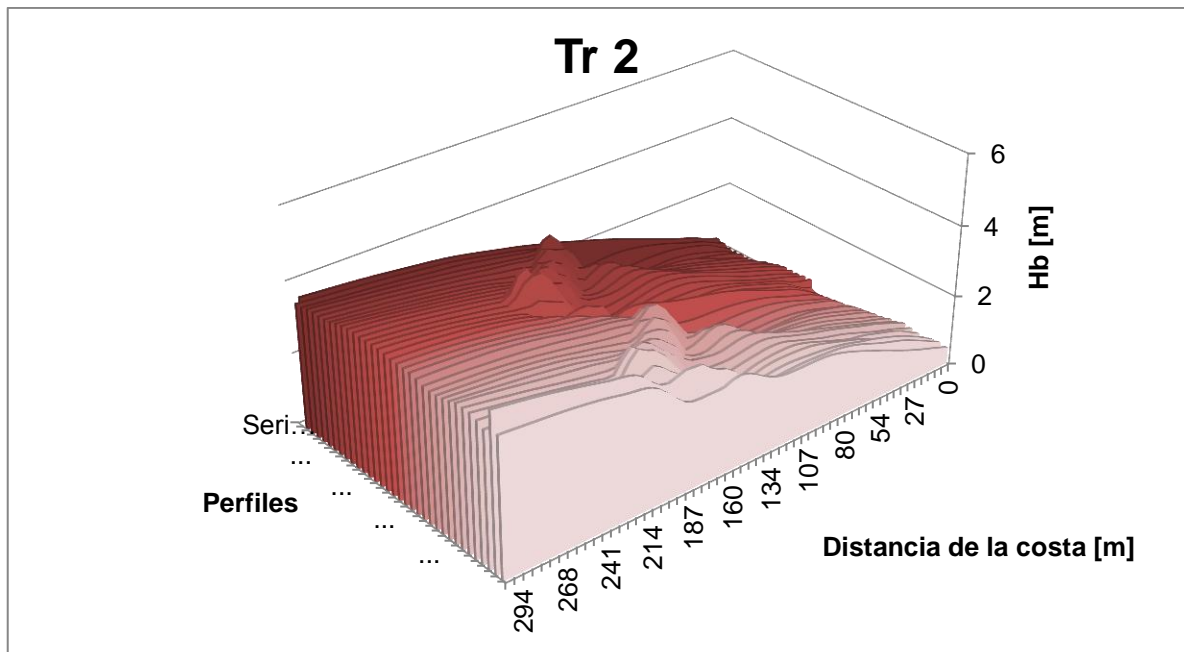


Gráfico 38: Perfil de Clima extremo Tr 2

Fuente: Elaboración Propia

Los Gráficos y Figuras de los periodos restantes se encuentran en la sección 11.2.3 del Anexo.

Idealmente se espera que la estructura “sobreviva” a estas condiciones extremas, dado esto se presenta en la sección 7.8 recomendaciones para evitar colapso de la estructura.

7.5.3.2 Estimación de Índice de Vortex

Con el número de Iribarren se determinó anteriormente el tipo de rompiente que existe en el sector, sin embargo no resulta muy diferenciador al clasificarlo como voluta. Dado esto que se utiliza el índice de vortex, con el fin de clasificar la intensidad de rotura del oleaje con respecto a la gradiente del fondo.

Se determinó que la gradiente ortogonal del fondo se debe utilizar en esta relación como el opuesto de la gradiente de contorno normal, ya que las olas se mueven en una dirección ortogonal (Mead, 2001). La diferencia de las gradientes de fondo se muestran en la Figura 61.

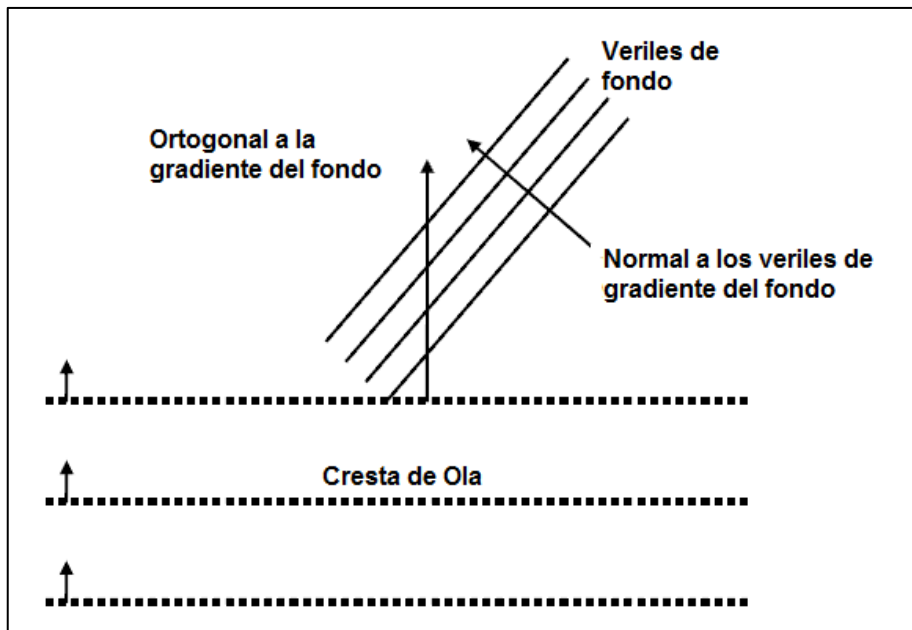


Figura 61: Gradiente de fondo

Fuente: (Mead, 2001)

La relación existente entre el índice de vortex y la ortogonal a la gradiente de fondo está dada por la Ecuación 42.

Ecuación 42

$$Y = 0.065X + 0.821$$

Donde:

Y: Índice de Vortex

X: Distancia Horizontal por unidad vertical de la ortogonal a la gradiente de fondo (gradiente = $1/x$).

El Gráfico 39 muestra el rango de valores de olas surfeables. El índice alcanza un límite de 1.5 sobre una gradiente cercana a 0,10 (1:10). Resulta difícil determinar la gradiente ortogonal del fondo debido a que la dirección del oleaje cambia constantemente debido a la refracción producida por el fondo. Mead recomienda utilizar una modelación numérica para predecir el índice de vortex sobre un fondo específico.

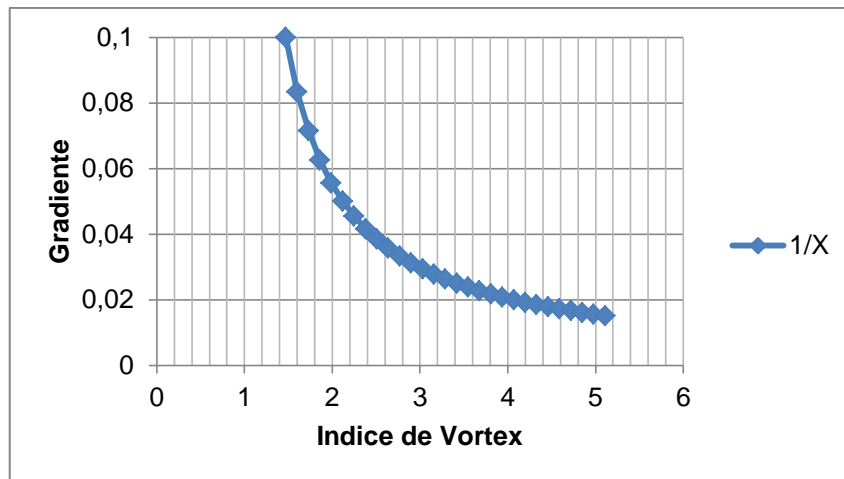
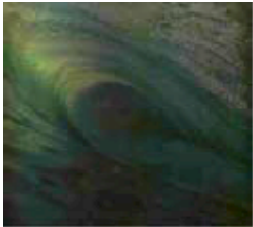


Gráfico 39: Gradiante v/s Índice de Vortex

Fuente: Elaboración Propia

Existe una variación del índice de vortex desde lo Alto a lo Extremo para la playa de Reñaca debido a los valores implementados en la gradiente de los diques más la gradiente original del fondo lo que finalmente resulta en olas más tubulares y huecas para el surfista. La Tabla 31, muestra de forma ejemplar el perfil ideal del oleaje en rompiente.

Tabla 31: Clasificación de la intensidad de rompiente

Intensidad	Extremo	Muy Alto	Alto
Índice de Vortex	1,6 - 1,9	1,91 - 2,2	2,21 - 2,5
Ejemplo de perfil de ola rompiente			

Fuente: Elaboración Propia

7.5.3.3 Estimación de tiempo de recorrido

El largo del recorrido surfable sobre los dique puede ser estimado como la distancia desde el punto de inicio de rompiente de la ola hasta el final del ala de la estructura.

La duración de este recorrido se estima mediante la relación entre esta distancia la celeridad del oleaje.

Existe un largo de alrededor de los 92 [m] para ser recorridos. Con condiciones de marea baja, se obtuvo un tiempo promedio de 25 [s]. Al ir aumentando la profundidad debido al incremento del nivel del agua por la marea, existe un aumento de la celeridad debido a que la ola presenta menor roce con el fondo por lo que el tiempo de recorrido promedio al momento de existir nivel de marea media es de 19 [s] y con marea alta unos 15 [s]. Estos valores corresponden al recorrido sobre la estructura, ya que este se puede extender más tiempo acercándose a la costa.

7.5.3.4 Canal de acceso

Se define un canal de acceso con el fin de utilizar de mejor forma la estructura. Estos están definidos en la Figura 62. Cabe destacar que esto corresponde a una recomendación de ingreso, ya que finalmente se puede acceder por donde lo estime el deportista.



Figura 62: Canal de acceso a dique.

Fuente: Google Earth

7.6 ANÁLISIS DE OPERACIÓN

Se realiza un análisis de operación con el fin de evaluar los parámetros previamente estudiados en la sección 5.3 y estimar el porcentaje de tiempo en el cual la obra final propuesta se encontrará apta para su funcionamiento y utilización. Esto se hace bajo las condiciones analizadas en la sección 6.1, en donde se determinó que los casos seleccionados representan un 77.76% del oleaje incidente desde aguas profundas, los que mediante un análisis de sensibilidad de las variables se redujo a sólo 9 casos transferidos, estos a su vez, están asociados a la fracción de oleaje en rotura de diseño equivalente a $Q_b=0.05$ con el fin de analizar el oleaje de mayor altura, lo que es más atractivo para el surfista.

Tabla 32: Análisis de operación de los diques

Condición oleaje en aguas profundas			Hb [m]		A. Descrestamiento [°]		Tipo de Surfista	Frecuencia de Ocurrencia
Dir	Tp [s]	Hs [m]	Norte	Sur	Norte	Sur		
SW	10	1,5	0,77	0,78	43,58	43,14	6	8,86%
	13	3	1,44	1,41	52,49	45,77	5	27,65%
	16	4,5	2,11	2,02	50,64	46,63	5	14,99%
SSW	10	1,5	0,38	0,37	43,61	37,26	6	4,50%
	13	3	0,78	0,76	43,58	43,14	6	7,11%
	16	4,5	1,18	1,16	50,36	45,93	5	4,06%
WSW	10	1,5	1,06	1,06	50,36	45,03	5	2,84%
	13	3	1,97	1,91	43,31	42,44	6	5,47%
	16	4,5	2,86	2,66	49,5	50,74	5	2,27%

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 32 muestra las condiciones de oleajes seleccionadas para ser transferidas desde aguas profundas, esto corresponde a 9 casos. También se observa el oleaje en rotura para cada dique, tanto del norte como del sur, los valores de ambos presentan diferencias de centímetros debido a que ambos cuentan con características similares como se observa en la sección 7.5.3. La orientación de los diques fue diseñada para obtener ángulos de descostamiento propicios para un nivel intermedio de surfista, es por esto que estos fluctúan entre los 37° y 52°. Al relacionar estos ángulos con las alturas de ola, se obtienen las clases de surfista 5 y 6 en la cual pueden ejecutar maniobras típicas consecutivamente en una ola simple, y en algunos casos, maniobras más avanzadas. La clase 5 y 6 presentan una frecuencia de ocurrencia de un 51,81% y un 25,95% respectivamente.

Finalmente se estima que las estructuras diseñadas funcionará un 77,76% del tiempo, lo que si se traduce en días del año, equivale a 283 días aproximadamente en los que se puede encontrar dichas condiciones.

7.7 CÁLCULO DE SALIENTE

En este estudio se utiliza el método de Kerry P. Black y Connon J. Andrews, debido a que presenta condiciones similares en el rango de oleajes y tamaño de sedimento en los cuales se desarrolló su investigación.

Utilizando la Figura 32 de la sección 4.7, se define que el diseño de ambos diques cuentan con un ancho (B) de 69.5 [m], como distancian entre la costa y el dique (S), se utilizara el punto más cercano que corresponde al extremo del ala. Para el caso norte esta distancia es de 110[m] y para el caso sur se ubica a unos 125 [m]. Utilizando la relación desarrollada por Black & Andrews se determina el largo y amplitud que presentaría la saliente con respecto a la distancia que se ubique desde la línea de costa.

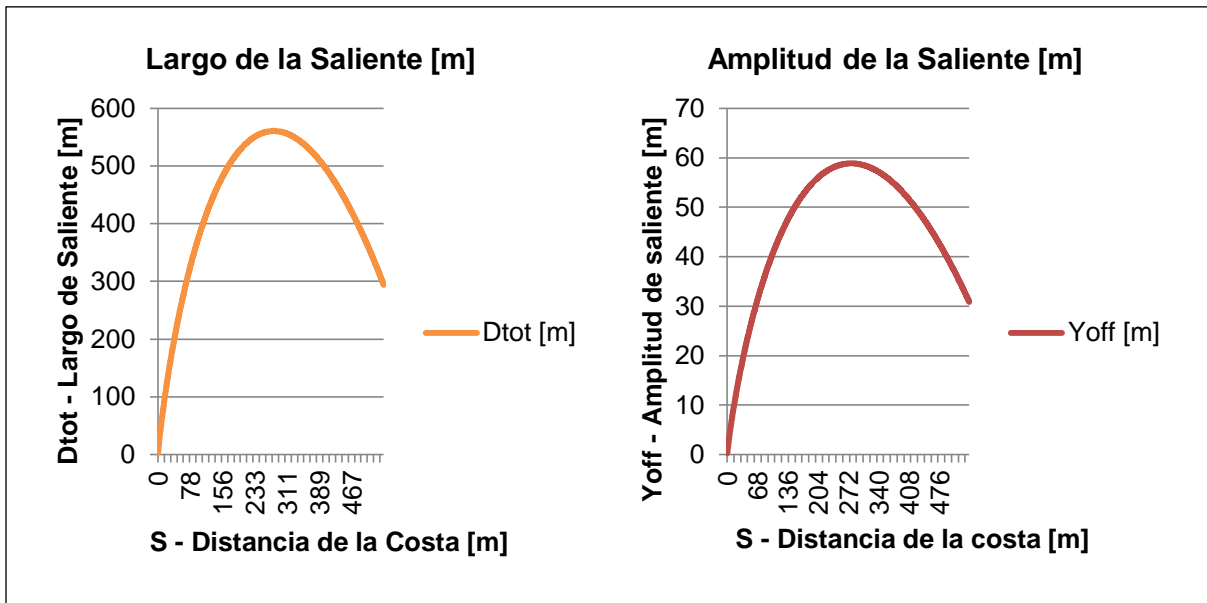


Gráfico 40: Largo y Amplitud de la Saliente

Fuente: Elaboración Propia

Como se aprecia en el Gráfico 40, tanto el largo como la amplitud aumentan sus distancia hasta alcanzar un peak de distancia desde la costa de 278 [m], para después comenzar a disminuir considerablemente lo que implica que el dique ya no genera un gran efecto sobre la costa.

Por otro lado, si la función principal del dique fuese maximizar la saliente de la playa, lo recomendado sería utilizar el peak de los 278[m]. Sin embargo se debe considerar que mientras más lejos se ubique el dique, existirán mayores profundidades, lo que genera un aumento de costo para la realización de la obra y una mayor dificultad en cuanto a su proceso constructivo.

Como el dique está diseñado para surfear, este está ubicado a una distancia considerable de la costa, ya que se toma en cuenta la distancia que debe remar un surfista para llegar a su punto de despegue. Se considera también que el dique no interfiera en el transporte de sedimentos a lo largo de la costa, generando tómbolos.

Según las dimensiones del diseño, se desprende del Gráfico 40 que la predicción del largo alcanzaría unos 403,5 [m] con una amplitud de 42,4 [m] aproximadamente para el dique norte y un largo de 433,5[m] y una amplitud de 45,5 [m] para la estructura ubicada al sur.

Dado esto, las recomendaciones de Black indican que la saliente debe ser construida mediante alimentación de la playa antes de la construcción del dique con el fin de que el sedimento que ya existe en la playa no sea utilizado para la estabilización de la playa, ya que una vez que la saliente se encuentra completamente formada y estabilizada, no existiría interrupción del flujo natural del sedimento.

Por otro lado, el CEM presenta varias teorías en la predicción de la respuesta de la línea de costa ante un dique sumergido (USACE, 2008), las diferentes teorías muestran un amplio rango en lo que respecta a la relación que se obtiene de B/S para la formación de salientes o tómbolos, de la Tabla V-3-6 del CEM se obtiene los siguientes valores basados en Dally y Pope (1986).

Tabla 33: Respuesta de la costa ante un dique. (USACE, 2008)

Formación	Rango de B/S	Valor promedio de B/S
Tómbolo	> 0,5 - 2,0	> 1,25
Saliente	0,5 – 0,67	0,59
Sin depósitos	≤ 0,125 - 0,5	< 0,25

Fuente: Elaboración Propia

Los rangos que definen el tipo de formación se muestran en la Tabla 33, y para el caso de la playa de Reñaca se obtiene un **B/S = 0,63** para la estructura norte y **B/S = 0,55** para la sur. Esto corresponde a una saliente en ambos casos, la estructura norte se encuentra más cercana a que no exista ningún tipo de formación.

Además existe un indicador (I_s) del tipo de respuesta de la playa desarrollado por Ahrens & Cox (USACE, 2008), desarrollado para estructuras que permiten un paso suficiente de energía de las olas, lo que minimiza la posibilidad de formación de tómbolos. Este indicador se obtiene mediante la Ecuación 43:

Ecuación 43

$$I_s = e^{(1.72 - 0.41 \frac{B}{S})}$$

Al calcular I_s para las condiciones de la playa de Reñaca se obtiene un valor de **4,31** y **4,45** para ambas estructuras que dado los valores de la Tabla 34 correspondería a una formación de saliente tenue en ambos casos.

Tabla 34: Indicador I_s para la predicción de formaciones en la playa. (USACE, 2008)

Formación	I_s
Tómbolo permanente	1
Tómbolo periódico	2
Saliente bien desarrollada	3
Saliente Tenue	4
Sin Formación	5

Fuente: Elaboración Propia

Analizando las diferentes teorías existentes se obtuvo en todas que existiría una formación de tipo saliente según los valores obtenidos. Ninguna teoría presentó la formación de tómbolos, lo que es favorable para el diseño.

7.7.1 Predicción del Volumen de la Saliente

Para realizar la estimación básica del volumen, se asume que el perfil de saliente se encuentra paralelo al perfil de batimetría existente del lugar con el fin de igualar las condiciones actuales. El área diferencial que existirá entre los dos perfiles es calculada mediante regla del trapecio cada un metro para obtener un mejor detalle. Para obtener un volumen estimado se utiliza la siguiente relación (Hearin, 2009):

Ecuación 44

$$\text{Volumen de saliente [m}^3\text{]} = (\text{Área de perfil de saliente} \times \text{Largo saliente}) / 2$$

Para ambos casos se utilizó un metro sobre el nivel del agua como saliente, para evitar una erosión inmediata y generar mayor estabilidad a la saliente desde el momento en que se genera, y así evitar pérdidas y generar costos posteriores. La máxima área de perfil de saliente obtenida para el dique norte es de 79,8 [m²], el Gráfico 41 muestra el nuevo perfil de la playa.

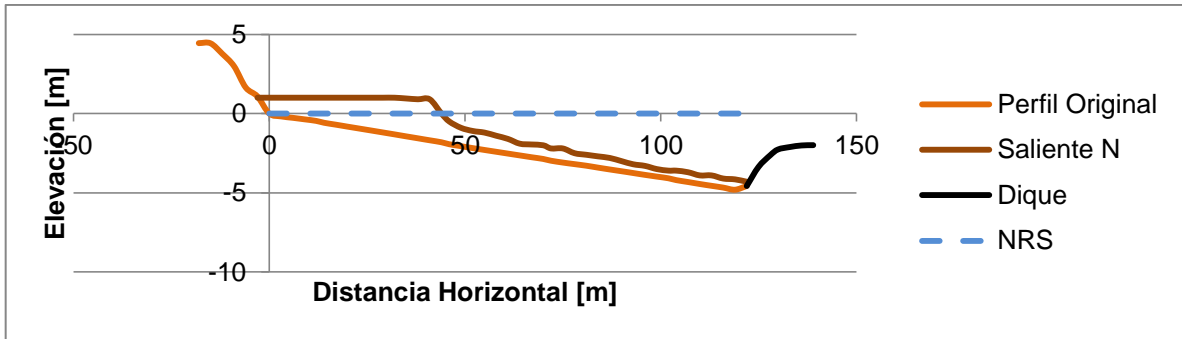


Gráfico 41: Predicción de perfil de Saliente Norte

Fuente: Elaboración Propia

El dique sur resulta con un área máxima de saliente de 133,36 [m²] como se muestra en el Gráfico 42. En ambos perfiles originales se utilizó las mediciones de la berma realizadas por Mauricio Molina de su bitácora de perfiles de la playa Reñaca (Molina, 2013). El perfil medido el 11 de mayo del 2013 es el que se muestra en las Gráficas Gráfico 41 y Gráfico 42.

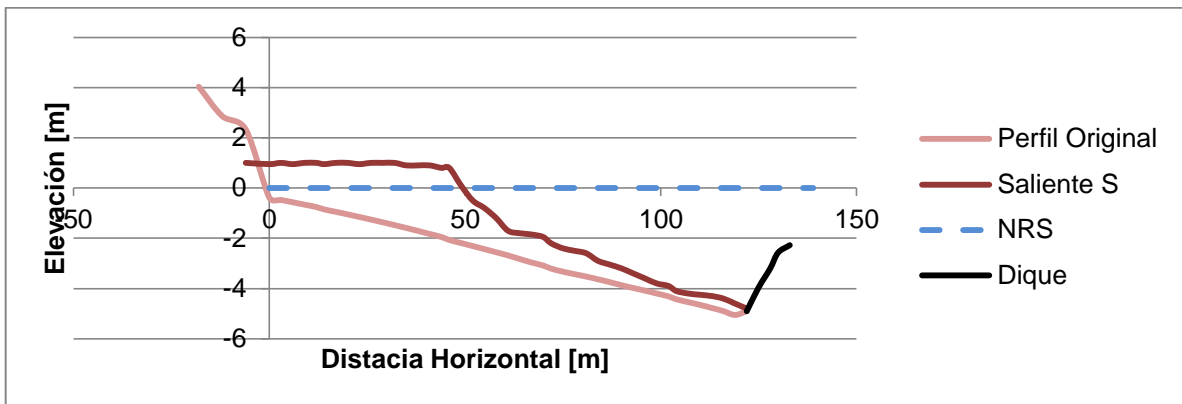


Gráfico 42: Predicción de perfil de Saliente Sur

Fuente: Elaboración Propia

Utilizando la Ecuación 44 se obtiene un volumen de 16.100,41[m³] y 28.906,5[m³] para el dique norte y sur respectivamente. Como existe un 21,33% de superposición de las salientes, que se puede observar en la Figura 63, finalmente resulta un volumen de saliente de **35.406,91[m³]**



Figura 63: Salientes

Fuente: Google Earth

7.8 MÉTODO DE CONSTRUCCIÓN Y MATERIALES

El inicio de los contenedores rellenos de arena data de unos 400 años, cuando se comenzó a utilizar para evitar y controlar la erosión costera en Alemania. (Harris & Sample, 2009)

Los primeros textiles utilizados eran materiales naturales degradables que sufrían de severas limitaciones, pero con el desarrollo de fibras sintéticas se alcanzó un punto de mayor durabilidad y resistencia de los materiales. Los problemas más usuales que presenta este tipo de material, corresponde al momento de contener el sedimento, debido a los diferentes tamaños y pesos que pueden presentar, por otro lado, la forma que el contenedor posea, determinará si el oleaje será reflejado o atenuado.

El estado de arte de los geotextiles, indica que hoy en día combinan características como gran fuerza, resistencia a la abrasión, a pinchazos, a rasgaduras y al deterioro por radiación UV. Además puede ser diseñada con una tonalidad parecida a la arena del sector donde se utilizará.

El término contenedor de arena (sand-filled container) es utilizado en estructuras pequeñas donde también se les conoce como “bolsas de arena”, las que por su tamaño se ven limitadas en pendientes estabilizadas en zonas más protegidas. Los de mayor tamaño (contenedores) pueden ser utilizados en zonas costeras más abiertas.

Dentro de los términos utilizados, se destacan los siguientes: bolsas, bolsas de arena, geobolsas, sacos, salchichas, tubos, geotubos, geocontenedores, geosistemas, etc. Una bolsa de arena standard, es llenada con aproximadamente $0,03[m^3]$ que corresponde a unos 40 [kg], esto permite llenar primero las bolsas más pequeñas y así ser transportadas y ubicadas en un nuevo lugar si es necesario. Mientras más pequeña la bolsa, más limitado queda su uso debido a su efectividad. Los contenedores de mayor tamaño pueden llegar a medir más de 100 [m] de largo con diámetros de 5 [m].

Generalmente el material se caracteriza por ser permeable, plano, y polimérico ya sea sintético o natural, que puede ser tejido, generando mayor resistencia a la tracción y a las rasgaduras, al contrario de los no tejidos que generan mayor resistencia a la punción, por lo que dependiendo de las características del sector donde se implementará, es el tipo que se utilizará.

El poliéster y el polipropileno son los materiales más utilizados en la fabricación de geotextiles ya que presentan un bajo costo.

Existen recomendaciones de ensayo para estos geotextiles aportados por el organismo de normalización de los Estados Unidos (ASTM), dentro de los más destacados y utilizados para la implementación de geotextiles como geotubos se muestran en la Tabla 35.

Tabla 35: Normas y sus propiedades utilizadas en Geotubos (Geosynthetics, 2014)

Propiedades	Valor		Unidad	Método de Prueba
	MD	CD		
Resistencia Tensión Nominal	70	105	kN/m	ASTM D4595
Elongación Resistencia Nominal	18	18	%	ASTM D4596
Resistencia Punzonamiento Estático	8000		N	ASTM D6241
Caudal	1200		l/min/m ²	ASTM D4491
Tamaño Aparente Apertura	0,425		mm	ASTM D4751
Resistencia Costura de Fábrica	70		kN/m	ASTM D4884
Resistencia UV Resistencia Retenida (500 hrs.)	80		%	ASTM D4355

Fuente: Elaboración Propia

Debido a estos grandes tamaños, deben ser rellenos en el mismo lugar donde se utilizaran, por lo que deben ser posicionados y ubicados con precisión antes de este proceso.

El llenado in-situ es desarrollado mediante bombeo de agua+arena, debido al material del geotextil, el agua fluye a través del material permeable dejando solo la arena en su interior. Para el caso de los geotextiles impermeables, se deja una salida temporal para que el agua salga, este último tiene la ventaja de poder ser llenado en primer lugar sólo con agua, tomando su forma total para luego reemplazar el agua por arena.

Uno de los métodos constructivos utilizados es el acopio de contenedores, los que pueden ser estabilizados tanto por el mismo peso de cada contenedor posicionado, o mediante el uso de tiras de refuerzo para amarrar y mantener la ubicación inicial de cada contenedor.

El dique arrecife estudiado para ser implementado en la playa de Reñaca, está diseñado para ser construido utilizando contenedores de geotextiles rellenos de arena, los que deben ser fabricados a medida para un mejor resultado.

Los contenedores deben ser posicionados en el lugar sin relleno alguno, para luego ser llenados en su posición definitiva.

Se utilizará un diseño de multiceldas con el fin de darle mayor resistencia ante cualquier peligro, pues si se daña una celda, no se verá estropeada toda la estructura y podrá ser reparada por partes.

En algunos casos se puede producir socavación bajo el geotubo, causando daños en la estructura debido a torsiones, desplazamientos, rotaciones y rupturas. Con el fin de evitar esta erosión, se utiliza ocasionalmente una manta anti-socavación con un geotubo más

pequeño a los extremos con el fin de alejar dicha erosión, ya que se hunde el sector del nuevo geotubo inclinando la manta hacia abajo protegiendo el suelo debajo de la estructura principal. (Beyá, 2007). Esto se realiza mediante buzos profesionales con ayuda de equipos de posicionamiento para mayor exactitud.

Es recomendable ubicar los geotubos más pequeños a los costados del principal, con una distancia mínima de 1.5 veces la altura del tubo principal.

Las dimensiones de estos dependerán de las condiciones hidrodinámicas y material de fondo del lugar del proyecto. La Figura 64 muestra un esquema de la implementación de la manta anti-socavación.

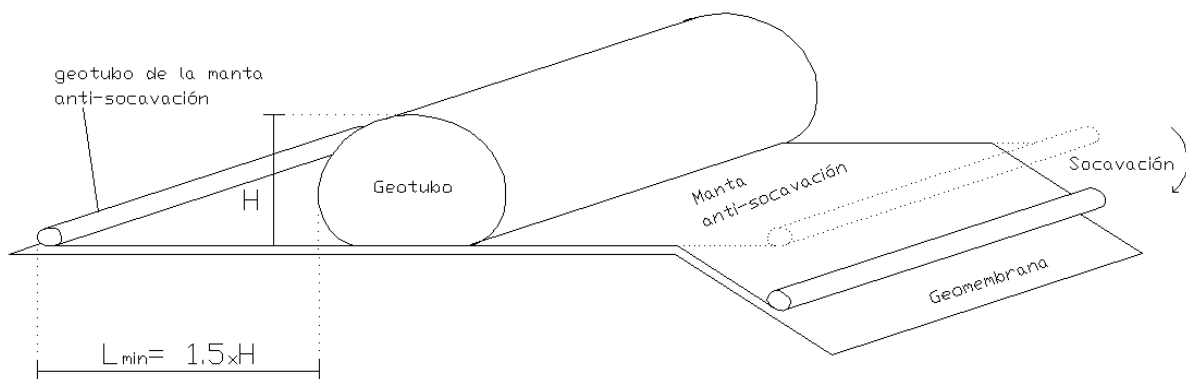


Figura 64: Manta Anti socavación.

Fuente: (Beyá, 2007)

Para el proceso constructivo se considerará como buena fecha para el inicio el mes de octubre en donde el oleaje de tipo temporal extremo es menos recurrente y la playa comienza a recuperarse de los embates del invierno.

La ubicación e instalación del dique debe ser determinada mediante sistema diferencial de GPS en todo momento para mantener el diseño. Se deben instalar anclas como puntos guías para asegurar y posicionar los contenedores principales.

Las celdas del dique deben ser llenadas con agua para verificar las dimensiones y largos y verificar si se encuentran dentro de la tolerancia admitida. Se deben realizar inspecciones finales una vez que los contenedores son posicionados para luego comenzar a ser llenados con arena. Se debe utilizar una mezcla de arena y agua de consistencia lodosa, la que es bombeada desde barcasas, utilizando bombas sumergibles.

Una vez posicionados, varios contenedores pueden ser llenados al mismo tiempo, esto dependerá de la capacidad de las bombas.

Los buzos deben monitorear cada paso de la operación de llenado manteniendo un proceso uniforme y sin interrupciones. Si es necesario, debe utilizar niveles de láser para verificar las pendientes finales definidas en el diseño.

Una vez que se complete el llenado, se deben sellar los puntos de llenado.

Se estimó que el volumen de arena necesario para el llenado es de **18.955,8** [m³], y se debe utilizar la misma fuente de arena para el relleno de los diques como la alimentación de la playa con el fin de trabajar con el mismo tipo de sedimentos.

Para la extracción del sedimento se requiere de embarcaciones especializadas, como dragas, y barcas para el transporte del sedimento. Para el proceso de deposición se deben utilizar bombas de capaces de trabajar con grandes cantidades de sedimento.

Con el fin de obtener un mejor funcionamiento a través del tiempo, es necesario un mantenimiento y monitoreo constante y en algunos casos realizar reparaciones al geotubo. Esta mantención debe ser siempre incorporada en la evaluación económica del proyecto donde se utilicen estos geotubos, pues una falla no reparada puede causar la pérdida del proyecto en un corto plazo.

Se deben realizar inspecciones de emergencia después de cualquier condición hidrodinámica extrema ocurrida en el sector del proyecto, ya que pueden generar solicitaciones importantes en la estructura.

En caso de existir alguna rasgadura, esta se puede reparar mediante el pegado de parches utilizando un adhesivo de curado rápido como 3M 5200, también se puede utilizar una máquina de coser de mano, grapas de acero (costura con Hogrings) o tapas apernadas (HDPE) (Beyá, 2007).

8 COSTOS

8.1 ALIMENTACIÓN DE SALIENTE Y RELLENO DE DIQUE

Como fue ya mencionado, la alimentación de la saliente de la playa resulta necesaria para prevenir la interrupción del transporte de sedimentos natural que existe en el sector, y así anticipar una estabilización de la playa, pues se puede generar erosión no deseada en el sector y el proyecto resultará contraproducente.

El volumen que se predijo en la sección 7.7.1 debe ser agregado a la playa con el fin de ampliar la línea de costa utilizando las técnicas pertinentes, y a su vez o en el periodo más cercano, rellenar los geotextiles con el fin de no perder el volumen de la saliente.

La saliente requiere de unos **35.406,94 [m³]** de sedimentos más los **18.955,79 [m³]** de volumen de ambos diques se obtiene un total de **54.362,74[m³]**.

La fuente de donde se obtendrá este relleno, será del estero Marga Marga, ya que este sector cuenta con sedimento de tipo Arena muy Gruesa (Vergara & Valenzuela, 1981) y se encuentra ubicada en una zona de máxima energía de las olas, lo que indica que el sedimento tendrá una mayor resistencia y peso en los contenedores en Reñaca ya que aquí se caracteriza por ser una zona de energía intermedia y cuenta con sedimento de tipo Arena gruesa.

Como existe un proyecto de hacer navegable la desembocadura del estero Marga Marga (Saavedra, 2014), la extracción de este sedimento sería favorable para esta zona.

Para obtener este volumen como se muestra en la Figura 65 se debe extraer alrededor de 1,3 [m] de profundidad de las áreas marcadas en rojo, como referencia, ya que se puede aumentar la profundidad de dragado y así disminuir el área de trabajo.

La superficie que está entre la línea de costa y el puente casino cuenta con 14.411,78 [m²], la siguiente con 8.842,82 [m²] y finalmente la más extensa entre el puente Ecuador y Villanelo de 18.438,42 [m²]



Figura 65: Área de obtención de sedimento

Fuente: Google Earth

Debido a que se exigió total confidencia con los datos de costos entregados, no se referenciará de donde provienen estos.

Para la obtención del sedimento, se analizan 5 valores de dragados, los que pueden ser combinados o simplemente utilizar uno de ellos. La Figura 66 muestra las dragas a utilizar.

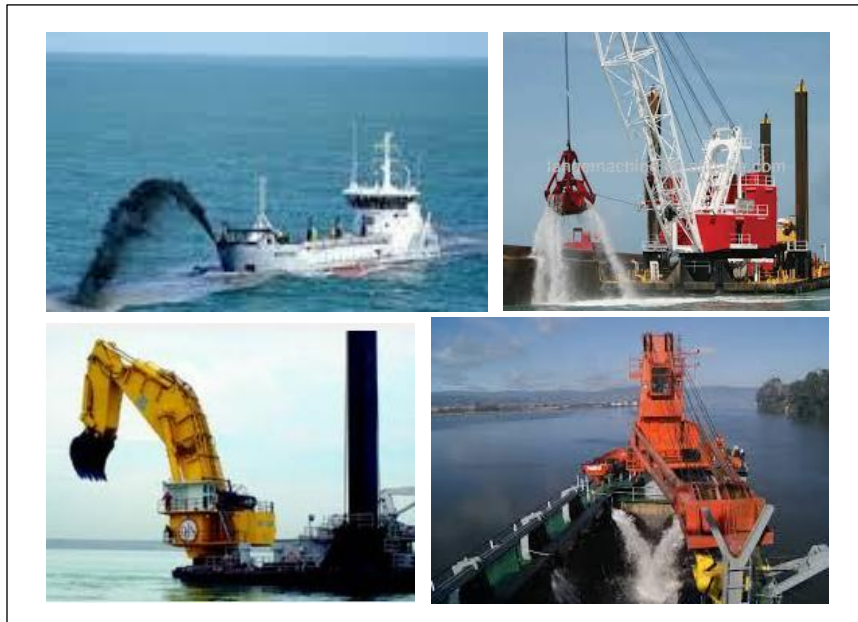


Figura 66: Dragas; Bomba Succión y Clamshell en la parte superior, Excavadora y Pinto en la parte inferior (De Izq. a der.)

Fuente: Elaboración Propia

Cabe destacar que para algunos casos, el aumento de volumen total a extraer, disminuye el costo por metro cúbico, como sucede con las primeras tres opciones a analizar en la Tabla 36, en las dos siguientes simplemente aumenta.

Los valores obtenidos por metro cúbico se obtienen de la relación al volumen total de 54.364,73 [m³] que se necesitan tanto para la saliente como para los dos diques y se encuentran en pesos chilenos actualizados al año 2014.

Tabla 36: Costos de extracción de sedimento.

	Precio por metro Cúbico [\$/m ³]	Total Extracción
Bomba Succión	\$ 29.341	\$ 1.595.108.575
Clamshell/ Excavadora	\$ 278	\$ 15.145.708
Clamshell+ Succión	\$ 18.023	\$ 979.797.783
Draga Pinto	\$ 20.521	\$ 1.115.584.059
Dragas Internacionales	\$ 14.187	\$ 771.271.302

Fuente: Elaboración Propia

La bomba a succión presenta el mayor costo de todas las opciones debido al tamaño y potencia que esta debe tener.

La Draga Pinto corresponde a la embarcación “Ernesto Pinto Lagarrigue” que trabaja tanto de manera estacionaria como no estacionaria. En el primer caso utiliza una draga tipo cuchara mediante una grúa y en el segundo caso funciona como tipo succión por arrastre.

En la sección 4.6.1 se nombraron proyectos en los cuales se utilizaron los geotubos con sus dimensiones y costos de construcción. A continuación la Tabla 37 muestra un resumen éstos por metro cúbico que resultaron de cada obra, al aplicar un ajuste de tendencia lineal con las 6 obras se obtiene solo un 15% de representatividad, lo que no resulta confiable, esto debido a que los costos por metro cubico obtenidos en Narrowneck son considerablemente inferiores a los demás proyectos, por lo que no se utilizará para la obtención del ajuste.

Tabla 37: Costos U\$/m³ de implementación de dique sumergido

Arrecife	Cables	Narrowneck	Pratte's	Mt. Maunganui	Boscombe	Kovalan
Volumen [m³]	5.500	70.000	1.600	6.500	13.000	4.000
Costo al año 2014 U\$	\$ 1.897.631	\$ 3.212.859	\$ 535.839	\$ 1.411.362	\$ 5.225.220	\$ 1.745.262
Costo U\$/m³	\$ 345	\$ 46	\$ 335	\$ 217	\$ 402	\$ 436

Fuente: Elaboración Propia

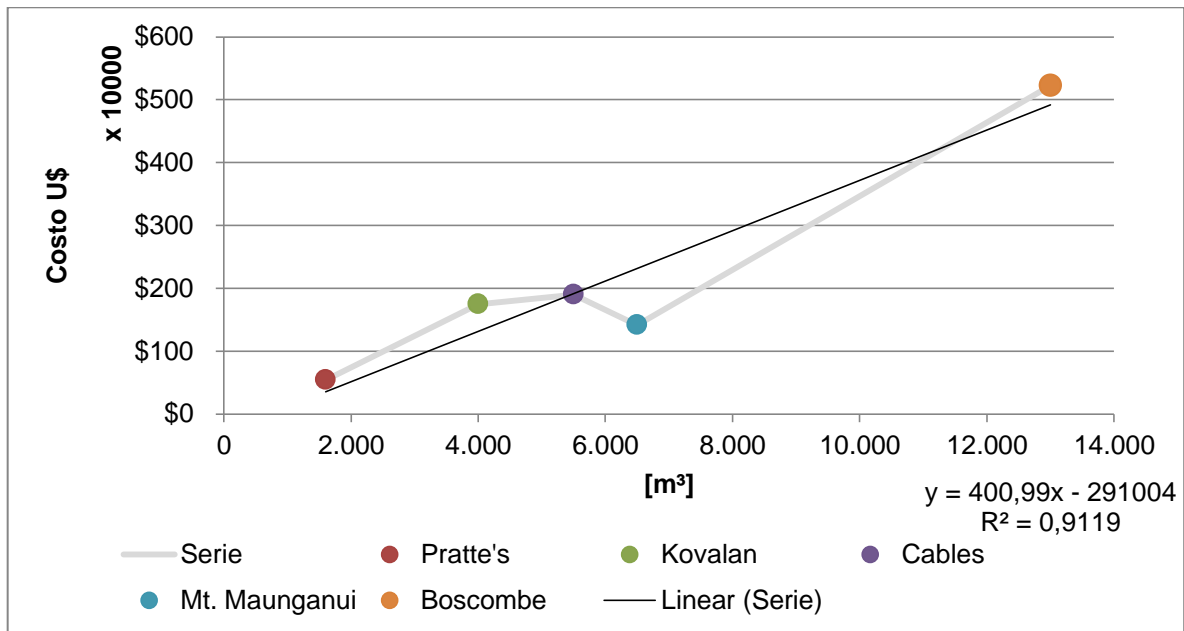


Gráfico 43: Costo por metro cúbico en obras

Fuente: Elaboración Propia

El Gráfico 43, muestra la relación metro cúbico v/s costo con un ajuste de un 91%.

Utilizando la tendencia lineal para obtener un valor por metro cúbico aproximado del proyecto, considerando que ambos diques a implementar cuentan con 18.955,79 [m³], se obtiene un valor de **385,64.- [U\$/m³]**.

Finalmente considerando el costo de extracción de sedimento utilizando la draga clamshell + succión debido a que requiere de menor tiempo que la clamshell/excavadora para la saliente, se tiene un costo de U\$ 1.063.585.- más la implementación de los diques con U\$ 7.310.078.-

El costo final de la obra es de U\$8.373.663.-

Este costo resulta más alto que todos los proyectos analizados ya que no cuentan con la implementación de la saliente para mantener equilibrada la playa, pues ningún proyecto se encuentra a un costado de desembocadura de río/estero que alimente la playa. Si no se implementa este equilibrio artificial, los sectores contiguos de la playa se pueden ver afectados por la erosión.

Tabla 38: Resumen de costos

	Dique Norte	Dique Sur	Ambos
Volumen [m³]	9392,22	9563,57	18955,79
Saliente [m³]	16100,41	28906,5	35406,936
Sedimento Requerido [m³]	25492,63	38470,07	54362,726
Costo Dique [U\$]	\$ 3.475.182	\$ 3.543.892	\$ 7.310.078
Costo Saliente [U\$]	\$ 483.639	\$ 868.319	\$ 1.063.585
Total [U\$]	\$ 3.958.821	\$ 4.412.211	\$ 8.373.663

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 38 muestra un resumen de los costos estimados asociados a la implementación de tanto un dique como ambos.

Cabe destacar que los costos finales son estimativos y se basan sólo en relaciones obtenidas con otros proyectos similares. La exactitud de estos solo se puede determinar con un estudio de ingeniería de detalle.

9 CONCLUSIONES

- Con fin de abordar un proceso costero como la regeneración de la playa y analizar si es apta y en qué grado lo es para desarrollar el surf, se estudiaron las variables físicas básicas de éste, modificándolos hasta obtener una respuesta deseada. Los parámetros principales utilizados para caracterizar el medio son la batimetría del sector y principalmente las direcciones y tamaño del oleaje que incidirán en playa.
- La batimetría resulta ser uno de los puntos más importantes dentro del estudio, ya que esto determina la forma en la que se protegerá la costa. Debido a que no existía información cercana al lugar a estudiar, sólo datos a un kilómetro de distancia. La forma en la que se obtuvo el estudio de batimetría fue mediante la utilización de un sistema topográfico de kayak el cual se puede implementar en una variedad de lugares donde el posicionamiento de una nave de mayor tamaño resulta ser más difícil y en este caso debido a la cercanía de la rompiente se torna más peligroso. Este simple sistema se caracteriza por requerir un personal de operación reducido, baja mantención y costos asociados, y principalmente es “amigable” con el medio ambiente. A pesar de no poseer gran exactitud como los sistemas tradicionales, sus resultados resultan esenciales para obtener análisis de prefactibilidad de implementación de alguna estructura.
- En relación al sedimento presente en la zona, se observa que existe mayor presencia de arena mediana y gruesa, y con el paso de los años este rango se ha ido acotando, pues en los estudios realizados en el año 1981, existía un sedimento moderadamente seleccionado, pasando a uno muy bien seleccionado, donde no existe gran variación del tamaño del grano, además los porcentajes de grava existentes en ese año eran mayores, pasando hoy en día a ser prácticamente cero, lo que implica una disminución en la rapidez del proceso de filtración del agua, obteniendo un retorno de resaca más fuerte, generando una pendiente levemente mayor hoy en día. Además se debe considerar que la presencia del estero, aporta un sedimento más bien fino debido a que en épocas estivales, se aplica un relleno estero arriba para uso de estacionamientos, el que se pierde con las subidas de caudal en épocas de invierno, depositándose finalmente en la playa. La distribución transversal del transporte longitudinal de la playa presenta valores considerables hasta los 7 metros, la obra se emplazará a partir de los 4 metros y es por esto, y para evitar cualquier tipo de erosión que se implementará una saliente artificial frente a ambos diques.
- Los arrecifes multifuncionales son una medida innovadora para abordar los problemas costeros y cuentan con varias ventajas sobre las medidas más duras. Los casos demuestran que las estructuras duras más tradicionales como diques verticales, o en pendiente, espigones y rompeolas pueden funcionar de manera eficiente. Si se predice una erosión de gran consideración el funcionamiento global de este tipo de estructuras demuestra un buen resultado. Las medidas más blandas,

como alimentación de playa sumergida, de berma, implementación de vegetación y estabilización de pendientes se consideran como soluciones a corto plazo. La erosión puede continuar con la misma velocidad y pronto la medida tomada requiere de ser aplicada nuevamente. Debido a la creciente intención de “trabajar con la naturaleza”, las soluciones blandas, resultan ser más efectivas sólo para el mediano y largo plazo cuando la erosión costera no constituye un riesgo en un corto plazo de unos 5 a 10 años. Su impacto disminuye y retrasa la pérdida de sedimento pero no la detendrá. Para obtener un efecto positivo a largo plazo se puede optimizar la solución blanda con la implementación de una dura como sustento lo que hará posible atacar el problema de erosión, alcanzando un límite de vida de no más de 10 años. (Carmo, Neves, & Voorde, 2010). Algunas medidas innovadoras han sido implementadas los últimos años, como sistemas de drenaje de playa, deposición de grava volcánica con el fin de retener la arena y fomentar la germinación de vegetación regenerando el suelo y formando dunas entre otras. La más sustentable resulta ser la construcción de barreras de arena mediante contenedores de geotextil; estos pertenecen a la familia de materiales sintéticos que incluye polietileno, polyester y polipropileno. En su forma más usual se caracterizan por ser flexibles, permeables y durables ya que resisten tensiones y desgarros. Pueden ser llenados y ubicados utilizando diferentes métodos dependiendo del lugar donde se trabajará. Otra ventaja de estos contenedores es que se caracterizan por mejorar el ecosistema marino en donde serán ubicados, pues proveen rico sustrato para la flora marina y el desarrollo de diversos ecosistemas (Jackson, y otros, 2004).

- Se deben tener en cuenta dos características importantes que afectaran considerablemente el efecto del ángulo de descrestamiento. En primer lugar es el ángulo que existe entre la dirección de procedencia del oleaje y la ubicación de dique, que viene a ser finalmente el ángulo de inclinación que presenta la estructura. Se observó que al aumentar este ángulo de inclinación se obtendrán mayores ángulos de descrestamiento hasta cierto punto. Cuando alcance por arriba de los 60° ya no se obtendrán ángulos de descrestamiento significativos, sino que se obtendrán ángulos oscilantes, es decir, no se obtendrá un valor medio como se espera, y el oleaje resultará romper en menores tamaños, lo que es ideal para la protección costera pero no para la surfeabilidad. En segundo lugar, las dimensiones y profundidades del dique determinarán en donde comienza a romper el oleaje, pues en aguas menos profundas, el ángulo de descrestamiento será más grande. Con el conocimiento de la profundidad a la que parte el dique y el largo de este se puede estimar el largo del recorrido que finalmente podrá efectuar el surfista. La estructura diseñada presentaría un recorrido de 92 [m] con variaciones en el tiempo de éste, ya que con distintos niveles de marea existe más o menos roce (asomeramiento) y la celeridad de ola varía. Con el estudio resulta claro que la forma de ola resultante está relacionada con la profundidad y pendiente que presente el dique, para abarcar más

casos de oleajes se requiere de distintas profundidades y pendientes, es por esto que el dique diseñado aborda esta relación.

Las corrientes pueden influir considerablemente en la surfeabilidad de una ola. No sólo dificultan la remada (braceo) del surfista sino que también afecta en el proceso de rotura del oleaje, por lo que deben ser incorporadas dentro del proceso de diseño del dique. Dentro de las formas para llevar a cabo una medición de corriente acorde al proyecto, se utiliza el seguimiento de partículas mediante un velocímetro; por medio de velocimetría de imágenes de las partículas; también se utiliza una filmadora con técnicas de pos proceso, que entregan imágenes binarias de alta calidad de las partículas flotantes. Estas técnicas requieren de un costo elevado e implementos adecuados, debido a no contarse con el presupuesto, no se llevó a cabo el estudio.

- En general, resulta esencial primero conocer todo el sistema socio-económico del sector en donde se realizará el proyecto, para así luego medir el impacto que tiene el surf en este sistema, y conocer el peso que tiene este. Para esto se debe realizar un estudio con el fin de evaluar la cantidad y nivel de surfistas, el lugar donde residen los surfistas locales, el transporte que prefieren para llegar e irse de la zona, los días que se quedan en el sector los surfistas extranjeros, el tipo de hospedaje que prefieren, las razones de porque elijen esta playa para practicar, cuanto gastan a diario, cuantas veces surfean al año, las opiniones sobre la implementación de un nuevo proyecto, entre otros puntos. Este estudio puede ser complementado con la evaluación del flujo de dinero que deja la industria del surf y sus servicios, como tiendas de surf, escuelas, campamentos de surf y competencias. El contacto con clubs de surf puede ayudar a obtener mejor información sobre el número de surfistas patrocinados, su edad, residencia, costos de transporte, su nivel de experticia, época del año en la que prefiere surfear, tipo de ola en la que se siente más cómodo, y finalmente ver si existe algún tipo de comunidad establecida, que tan popular es el surf en el área. Este estudio puede ser relacionado con el impacto indirecto que genera el surf en la economía local, ya que este deporte impacta positivamente en las actividades económicas relacionadas con el turismo y ocio, restaurants, bares, agencias de turismo, deporte y actividades en el mar, incrementando el atractivo en el comercio y servicios del área y finalmente el turismo en el país.

10 REFERENCIAS

- Alday, M. (2014). *Metodología de Diseño de Arrecifes Artificiales para Condicionar la Rotura del Oleaje*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María Departamento de Obras Civiles.
- ASR. (2008). *A Review of Existing Multi-Purpose Artificial Surfing Reefs and the Physical Properties behind their Function*. Brevard County Florida: ASR America Marine Consulting and Research.
- AulaFacil. (13 de 8 de 2014). *AulaFacil*. Obtenido de <http://www.aulafacil.com/CursoEstadistica/Lecc-9-est.htm>
- BBC. (2 de Octubre de 2014). *BBC*. Obtenido de Physics: <http://www.bbc.co.uk/bitesize/higher/physics/radiation/waves/revision/1/>
- Beyá, J. (2007). *Análisis de la utilización de geotubos en proyectos de protección costera*. Chile: Instituto Nacional de Hidráulica.
- BNPS. (18 de 8 de 2014). *The Telegraph*. Obtenido de Artificial surf reef in Bournemouth closed to the public: <http://www.telegraph.co.uk/news/uknews/8424616/Artificial-surf-reef-in-Bournemouth-closed-to-the-public.html>
- Cade-idepe. (2004). *Diagnostico y clasificación de los curso y cuerpo de agua según objetivos de calidad: Cuenca del Rio Aconcagua*. Gobierno de Chile, Ministerio de Obras Publicas, Dirección General de Aguas.
- Cantabria, U. d. (2000). Documento de referencia. En G. d. Costas, *Volumen I, Dinámicas*. España: Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General de Costas.
- Carmo, J. A., Neves, M., & Voorde, M. t. (2010). Desising a multifuncional artificial reef: Studies on the influence of parameters with most influence in the vertical plane. *Coastal Conservation*, 99-112.
- Cristina San Martín, C. R. (13 de 8 de 2014). *SciELO*. Obtenido de Flora y Vegetación del Estero Reñaca (V Región, Chile): http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-66432001000100004
- Dietrich, J. (14 de 8 de 2014). *Easy Reader News*. Obtenido de Making Waves: <http://archive.easyreadernews.com/archives/news2000/0907/coverstory.php>
- E. Valenzuela, E. R. (1979). PETROLOGÍA SEDIMENTARIA DEL LITORAL Y LA PLATAFORMA CONTINENTAL DE VALPARAISO . V REGIÓN. *Segundo Congreso Geológico Chileno - Arica*, 101-120.
- Galeon. (Septiembre de 25 de 2014). Obtenido de Hispavista: <http://fotos.hispavista.com/presentacionAlbum/visualizarFoto/index.phtml?idFoto=34502&nombreAlbum=fotosdevinadelmar&orden=>
- Geosynthetics, A. (4 de Agosto de 2014). *ACETube®*. Obtenido de http://www.geoace.com/upload/download/object_48.pdf
- González, A. (14 de 8 de 2014). *Monografias*. Obtenido de <http://www.monografias.com/trabajos90/medidas-posicion-y-forma/medidas-posicion-y-forma.shtml>

- González, I. (1976). Sedimentología litoral de la provincia de Valparaíso, Chile. *Actas 1er Congreso de Geología Chile, Vol II*, 217-241.
- Gourlay, M. (1981). Beach processes in the vicinity of offshore breakwaters. *Proceedings of the Fifth Australian Conference on Coastal and Ocean Engineering*. Perth, Australia.
- Granada, U. d. (2009). *Modelo Swan. Manual de Uso*. Dinámica Ambiental.
- Harris, L., & Sample, J. (2009). The evolution of Multi-Celled Sand-Filled Geosynthetic Systems for Coastal Protection and Surfing Enhancement. *Reef Journal*, Vol. 1, No 1, 1-15.
- Hearin, J. (2009). Preliminary Design of an Artificial Surfing Reef for Cocoa Beach, Florida. *Reef Journal*, 212-234.
- Henriquez, M. (2004). *Artificial Surf Reef*. Delft, The Netherlands: Delft University of Technology.
- Hutt, J. K. (2001). Classification of breaks in relation to surfing skill. *Journal os Coastal Research, Special Issue*, 66-81.
- INE. (24 de Septiembre de 2014). *Instituto Nacional de Estadísticas*. Obtenido de Región de Valparaíso: http://www.inevalparaiso.cl/contenido.aspx?id_contenido=35
- Jackson, L., Reichelt, R., Restall, S., Corbett, B., Tomlinson, R., & mcGrath, J. (2004). Marine ecosystem enhancement on a geotextile coastal protection reef-Narrowneck reef case study. *29th Internacional Conference on Coastal Engineering*, (págs. 3790-3952). Lisbon, Portugal.
- Jensen, C. (2010). *Kovalam Multin-Purpose Reef*. Regland, New Zealand: ASR.
- José Antunes do Carmo, M. t. (2011). Enhancing submerged coastal constructios by incorporating multifuncional purposes. *Journal Coastal Conservation*, 15:531-546.
- José M. de la Peña Olivas, F. J. (2003). Ordenación de Playas para la Práctica. *Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX-Ministerio de Fomento*. España.
- LLC, C. M. (12 de 11 de 2014). *US Inflation Calculator*. Obtenido de www.usinflationcalculator.com
- Mead, S. y. (2001). Predicting the breaker intensity of surfing waves. *Journal of Costal Research, Special Issue*, 51-65.
- Mercurio, E. (1 de Julio de 2007). EL día que Reñaca no olvida.
- Mercurio, E. (26 de Septiembre de 2014). *Ingeniería Civil Oceánica*. Obtenido de <http://www.ingenieriaoceanica.cl/index.php/2012/169-demuelen-paseo-de-renaca-para-construir-nuevo-parque-costero>
- Molina, M. (2013). *Bitácoras de Perfiles, Playa Reñaca*. Viña del Mar.
- Molina, M. (2014). *Caracterizacion de la Playa Reñaca Mediante perfiles y muestreos de sedimentos*. Valparaíso: Ingeniería Civil Oceánica.
- Mr L.A. Jackson, M. W. (2003). *An Artificial Reef to Protect Surfers Paradise Beach Developing & Implementing the Science*. Australia: Soil Filters Australia Pty Ltda.
- Nir, Y. (1982). Offshore artificial structures and their in fluence on the Israel and Sinai Mediterranean beaches. *Proceedings of the 18th International Conference on Coastal Engineering*, 1837-1856.

- P, K., Black, C. J., & Andrews. (2001). Sandy Shoreline Response to Offshore Obstacles Part 1: Salient and tombolo Geometry and Shape. *Journal of Coastal Research*, 82-93.
- Panoramio. (25 de Septiembre de 2014). Obtenido de Google Maps: http://www.panoramio.com/user/2113532?comment_page=4&photo_page=21
- Pattiaratchi, C. (2003). *PERFORMANCE OF AN ARTIFICIAL SURFING REEF: CABLE*. Colombo, Sri Lanka: COPEDEC VI.
- Project, T. C. (19 de 8 de 2014). *Coastal Protection Solutions: Hard & Soft Engineering*. Obtenido de http://www.thecoastalproject.org/2013_05_01_archive.html
- Ramos, S. G. (2009). Cambios del perfil de playa inducidos por el transporte transversal.
- S.T Mead, K. B. (1998). *An Artificial Offshore Reef at Tay Street-Mount Maunganui Beach*. Technical Report.
- Saavedra, N. (8 de Mayo de 2014). *Qué Pasa*. Obtenido de <http://www.quepasa.cl/articulo/negocios/2013/01/16-10948-9-el-rescate-del-marga-marga.shtml>
- Scarfe, B. M. (2003). The Science of Surfing Waves and Surfing Breaks - A Review. *Proceedings of the 3er International Surfing Reef Symposium* (págs. 37-59). San Diego: Scripps Institution of Oceanography Technical Report.
- SHOA. (2005). Instrucciones Oceanográficas N°1. *Especificaciones Técnicas para Mediciones y Análisis Oceanográficos*.
- Sostenible, D. d. (26 de 12 de 2014). *FAO*. Obtenido de Transporte de Sedimentos: www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s07.htm
- SPM. (1984). En U. A. Station, *Shore Protection Manual* (pág. 337). Washington: Coastal Engineering Research Centre.
- Surf2Surf. (18 de 8 de 2014). *Scoop Cultura*. Obtenido de <http://www.scoop.co.nz/stories/CU0512/S00145.htm>
- SURFRIDER. (3 de Octubre de 2014). *Surfrider Foundation Australia*. Obtenido de http://www.surfrider.org.au/science-of-the-surf/science_surfbreak_protection
- Tourism, N. Z. (11 de Oct de 2013). *New Zealand*. Obtenido de <http://www.newzealand.com/int/mount-maunganui/>
- Urra, L. (1973). *Estudio Geotécnico del trazado carretero playa Miramar-puntilla Tunquén, Proyecto de Carretera Valparaíso Algarrobo*. Santiago: Depto. Geodesia, Facultad de Ciencias Físicas y Naturales, Universidad de Chile.
- USACE. (2008). *Coastal Engineering Manual 1110-2-1100*. Washington, D.C.: U.S. Army Corps of Engineers.
- Valdes, J. M. (1995). *Dique Arrecife: Análisis de los métodos de diseño*. Madrid: CEDEX.
- Vergara, H., & Valenzuela, E. (1981). Sedimentación Reciente en Playas de Valparaíso, V Región. *Revista Biología Marina Instituto Oceanológico Universidad de Valparaíso*, Vol. 17 N°2, 267-283.
- Villaverde, J. M. (1998). *Hidrodinámica del Perfil de Playa*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

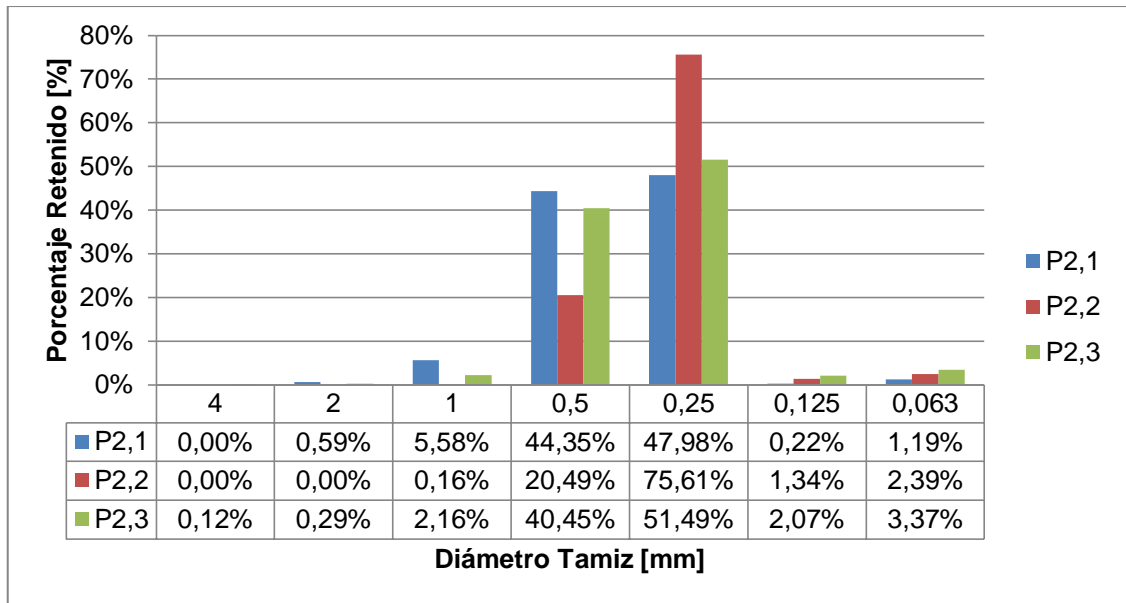
Walker, J. R. (1972). Recreational surfing on Hawaiian reefs. *Proceedings of ICCE, ASCEO*, 2609-2628.

WindGuru. (26 de 06 de 2013). *Wind Guru*. Obtenido de http://www.windguru.cz/es/historie.php?getspot=&id_georegion=5&id_zeme=152&id_region=0&mis_spot=120881&search=&id_typspot%5B1%5D=1&id_typspot%5B2%5D=2&id_typspot%5B6%5D=6&id_typspot%5B4%5D=4&id_typspot%5B3%5D=3&id_typspot%5B5%5D=5&id_typspot%5B10%5D=10&id

11 ANEXO

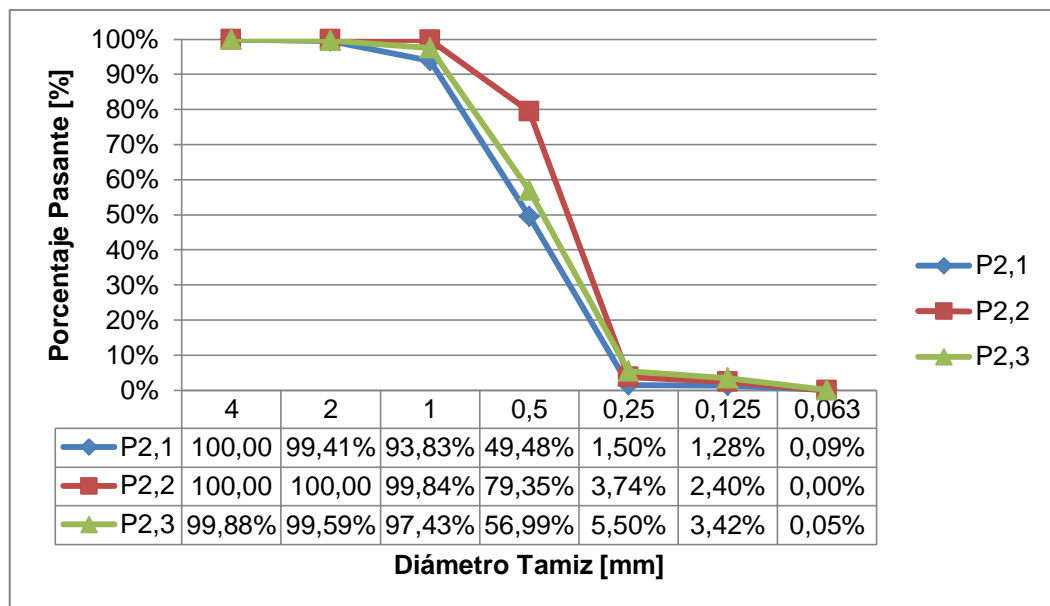
11.1 RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Gráfico 44: Porcentaje Retenido en Perfil 2



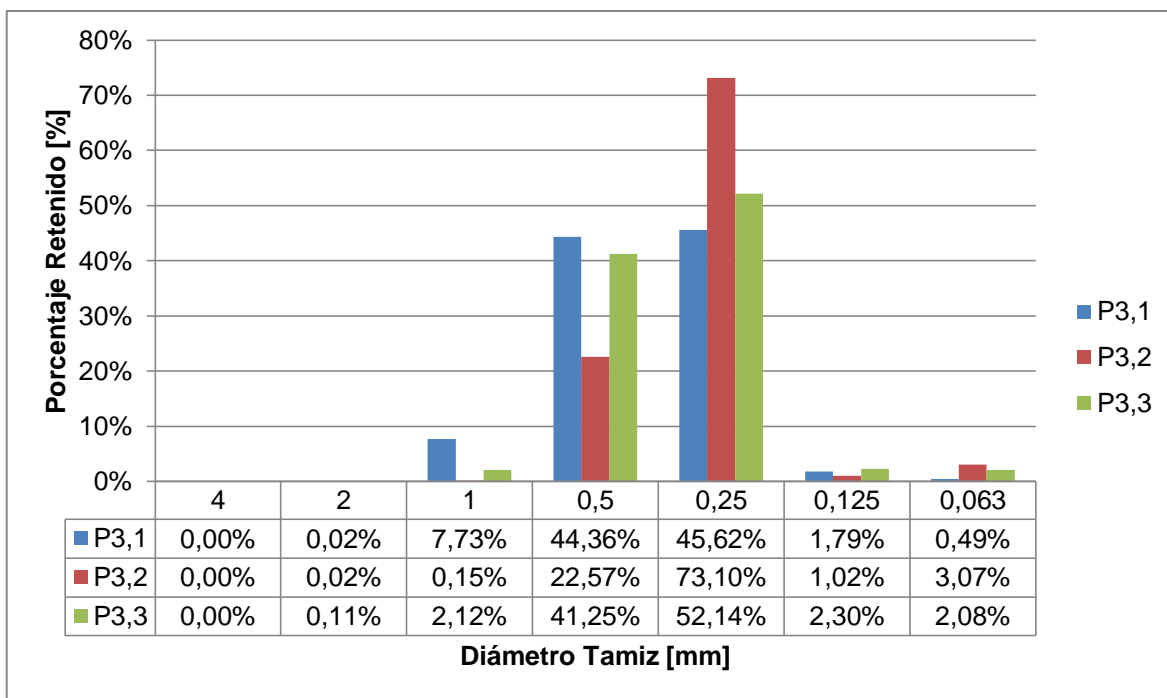
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 45: Curva Granulométrica Perfil 2



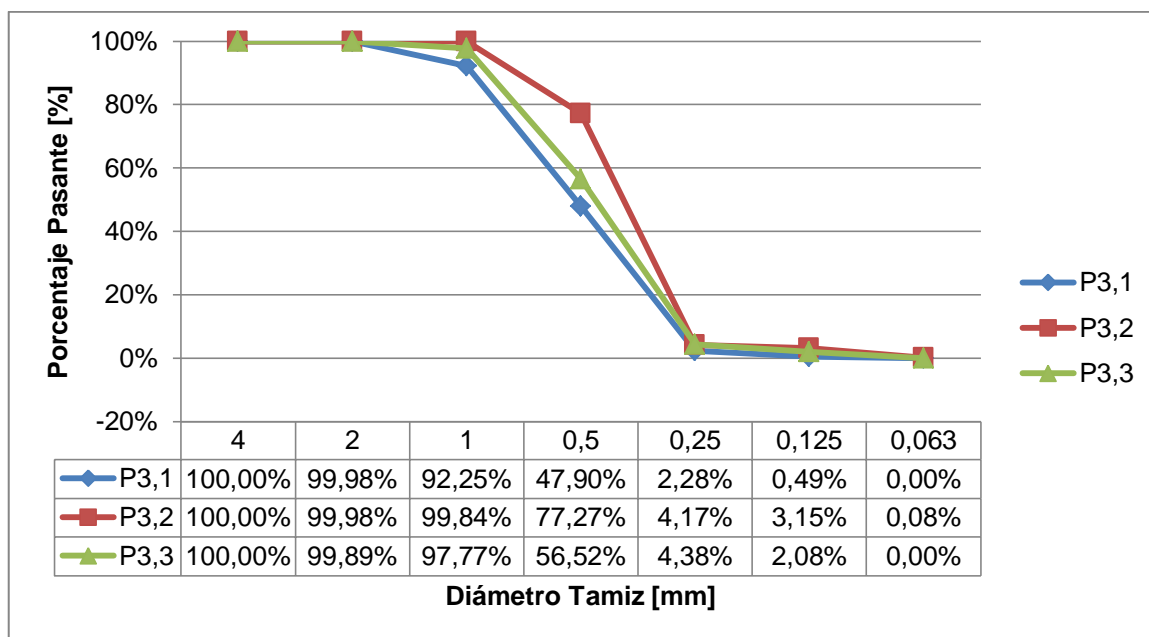
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 46: Porcentaje retenido Perfil 3



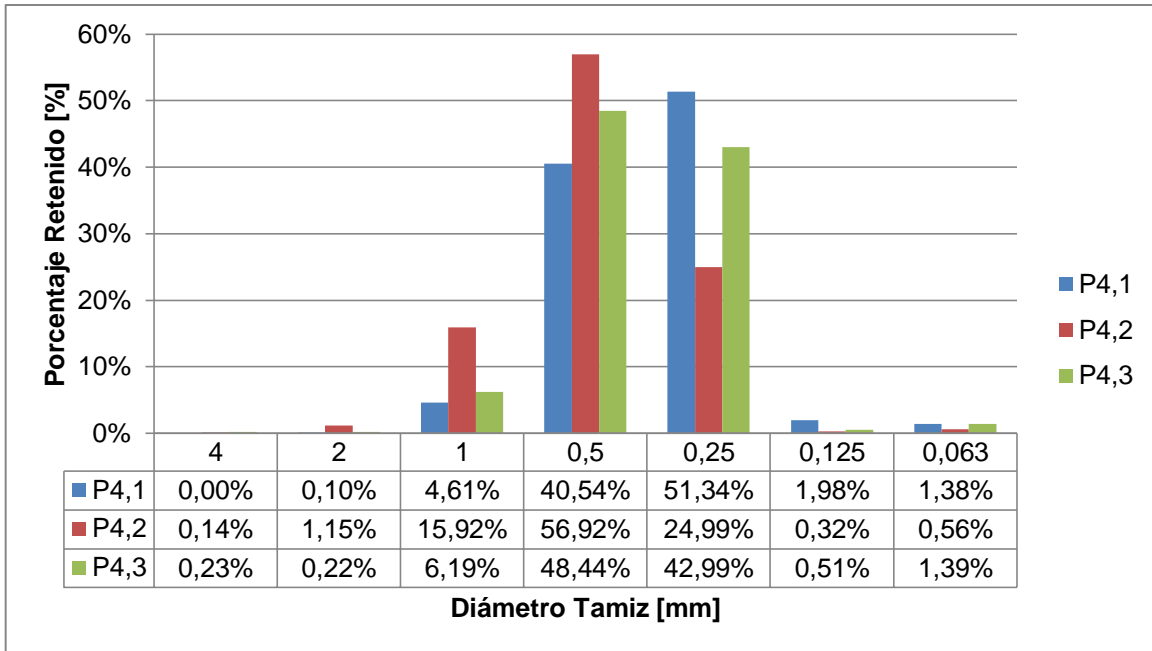
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 47: Curva Granulométrica Perfil 3



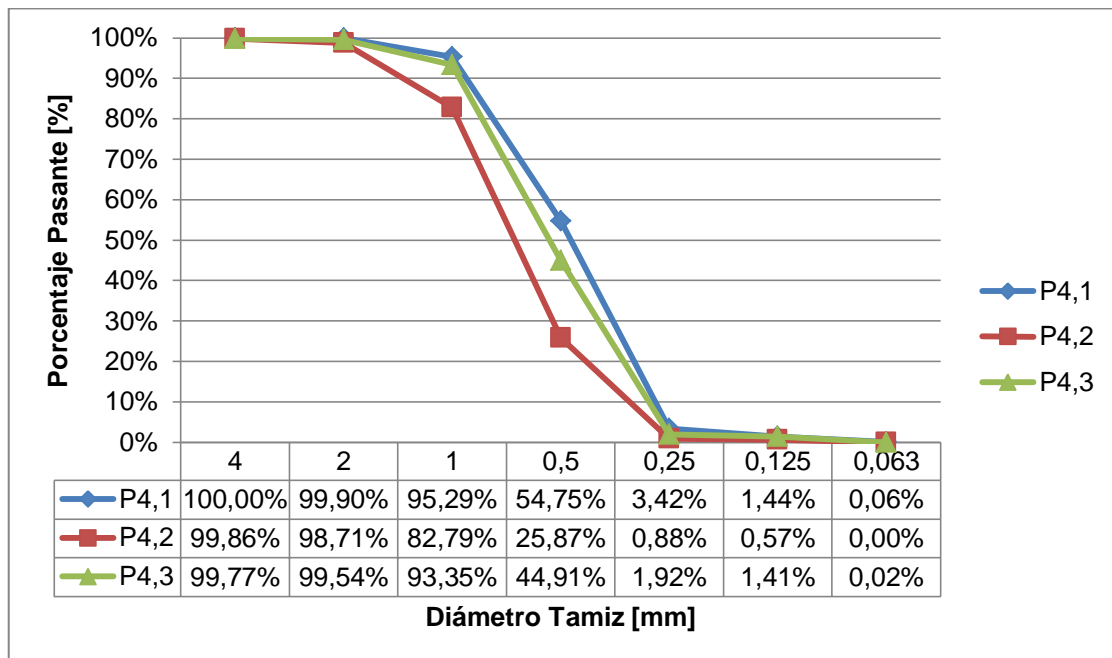
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 48: Porcentaje Retenido Perfil 4



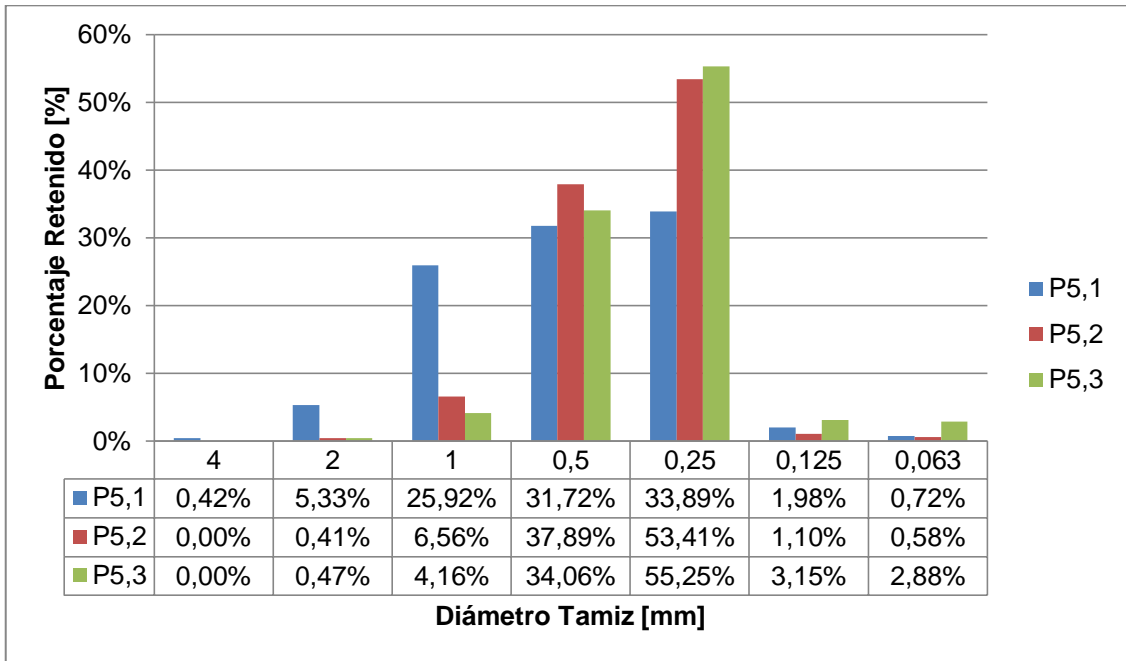
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 49: Curva Granulométrica Perfil 4



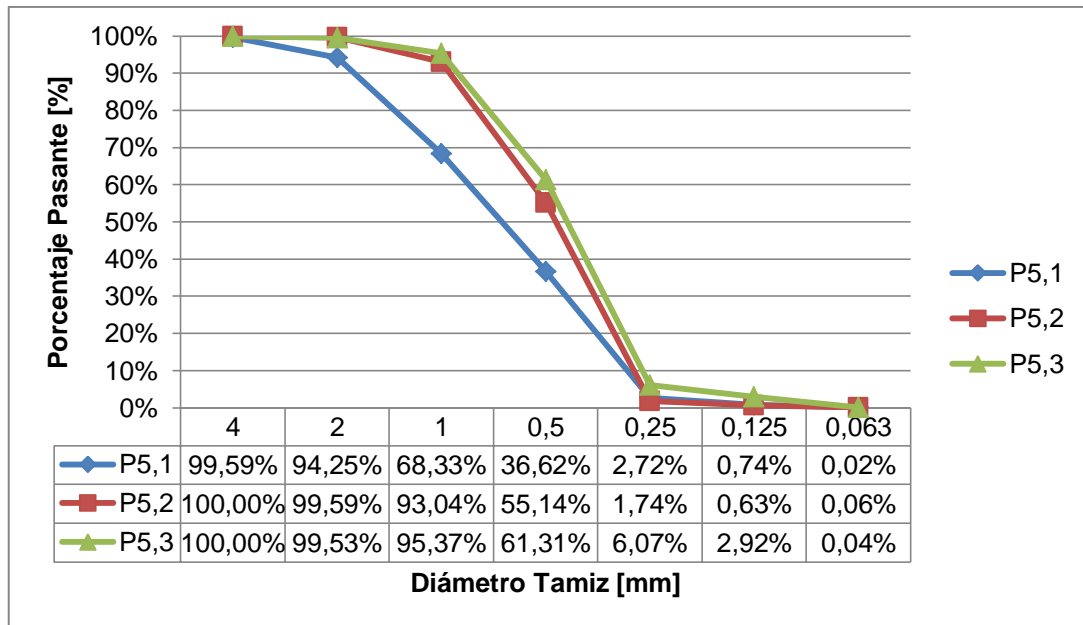
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 50: Porcentaje Retenido Perfil 5



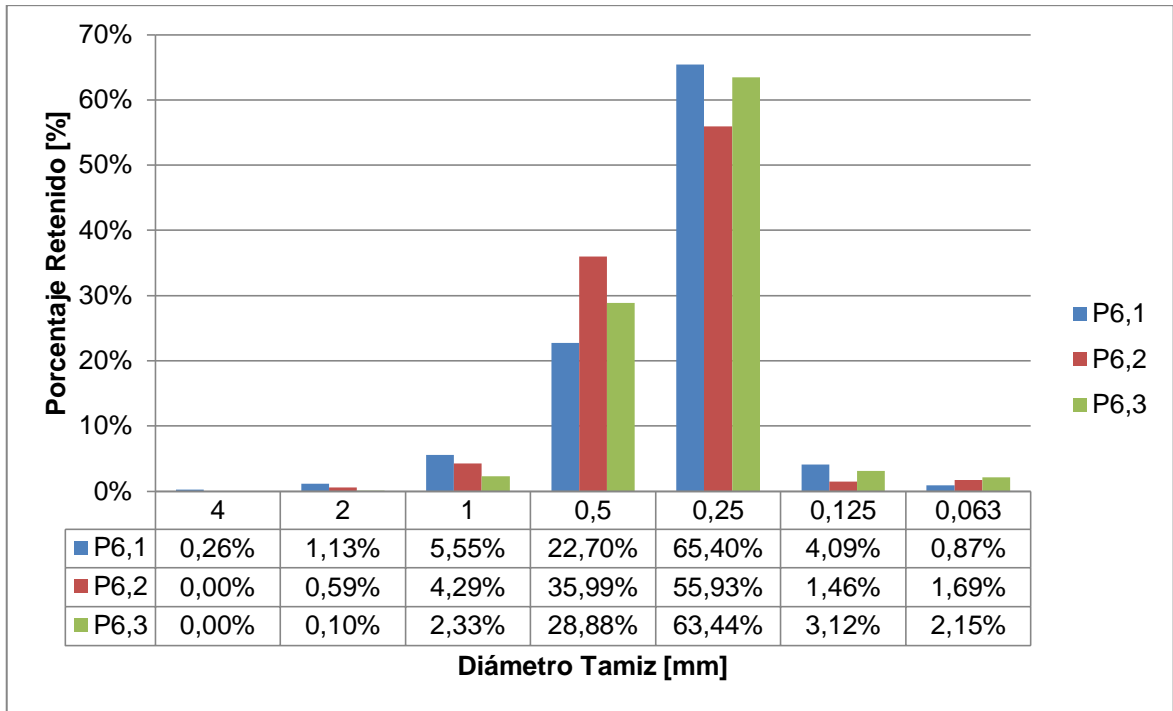
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 51: Curva Granulométrica Perfil 5



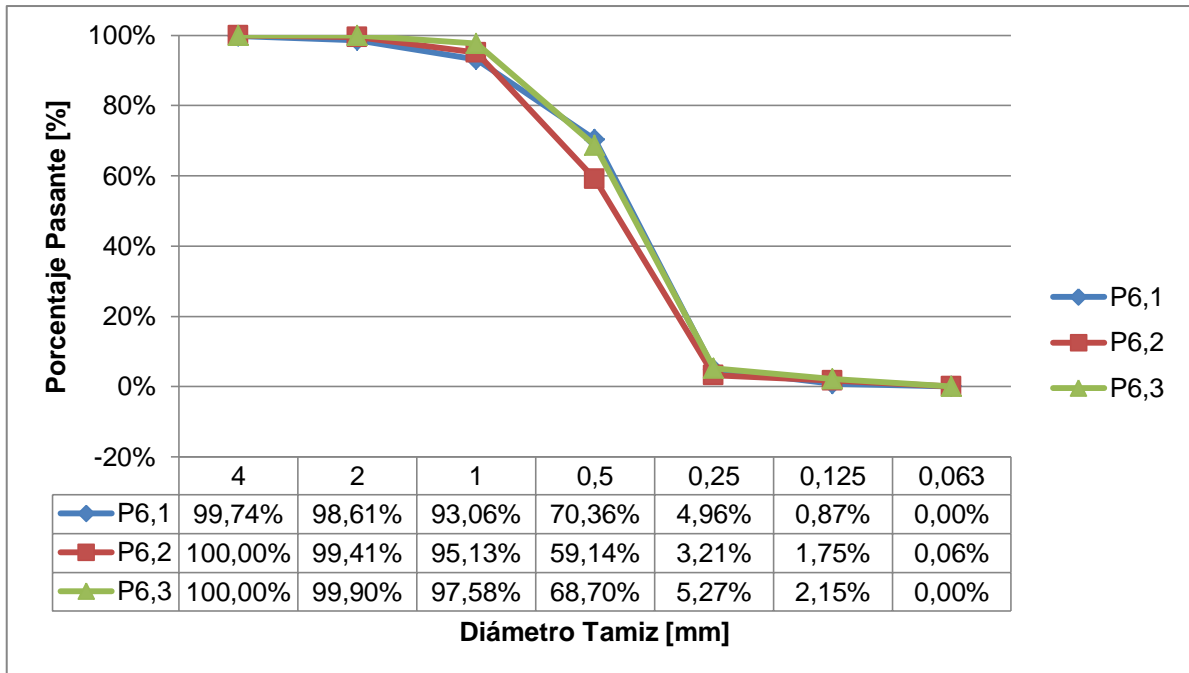
Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 52: Porcentaje Retenido Perfil 6



Fuente: Elaboración Propia

Gráfico 53: Curva Granulométrica Perfil 6



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 39: Resultado de Indicadores Estadísticos

Perfil	Curtosis	Asimetría	Desviación Estándar	Tamaño Promedio
P1,1	0,829	0,442	0,236	0,634
P1,2	0,675	0,055	0,244	0,708
P2,1	0,907	0,409	0,283	0,683
P2,2	1,568	0,419	0,176	0,473
P2,3	0,842	0,350	0,252	0,643
P3,1	0,998	0,420	0,303	0,698
P3,2	1,542	0,442	0,191	0,507
P3,3	0,792	0,385	0,240	0,642
P4,1	0,717	0,405	0,248	0,658
P4,2	1,355	0,268	0,397	0,823
P4,3	0,936	0,316	0,293	0,700
P5,1	1,066	0,512	0,645	1,132
P5,2	1,037	0,514	0,298	0,675
P5,3	0,870	0,425	0,251	0,635
P6,1	1,154	0,589	0,293	0,597
P6,2	1,343	0,554	0,323	0,648
P6,3	0,951	0,449	0,227	0,588

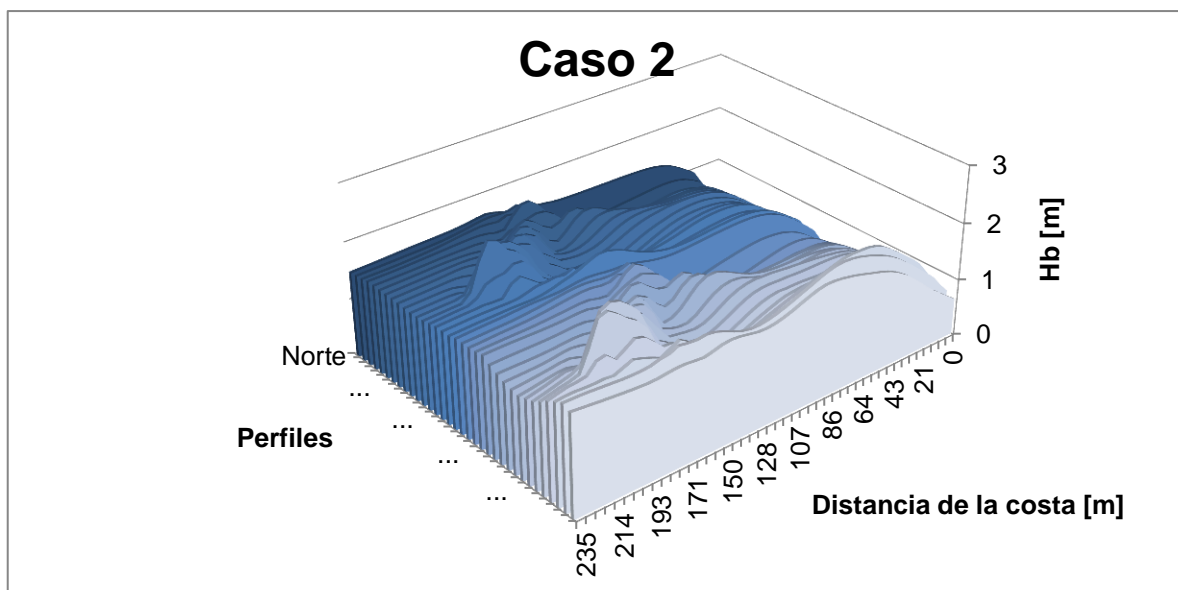
Fuente: Elaboración Propia



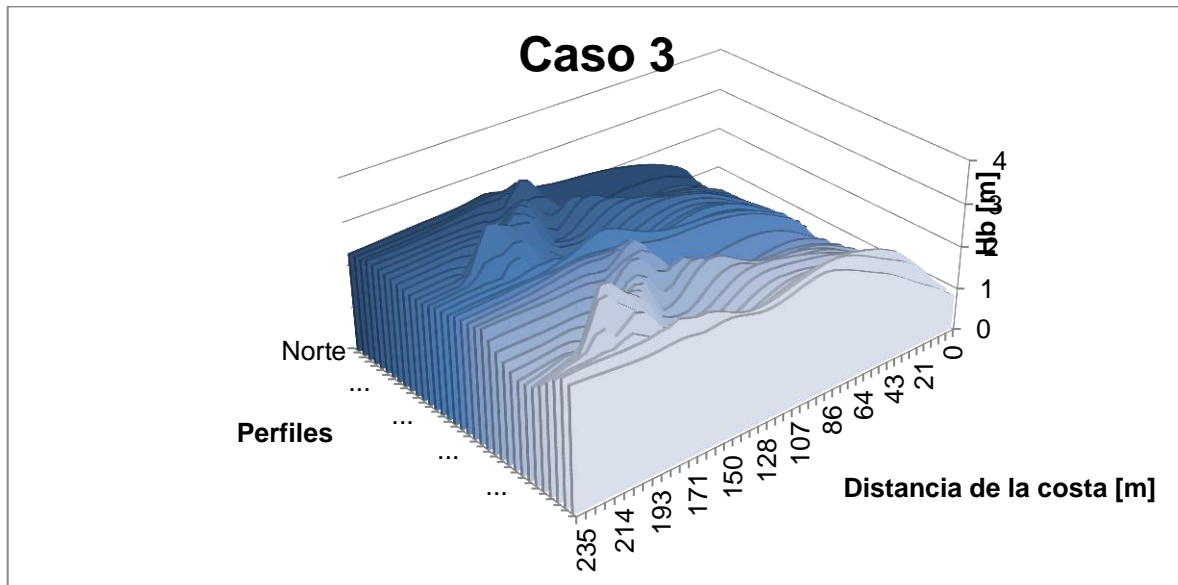
Figura 67: Azimut

Fuente: Google Earth

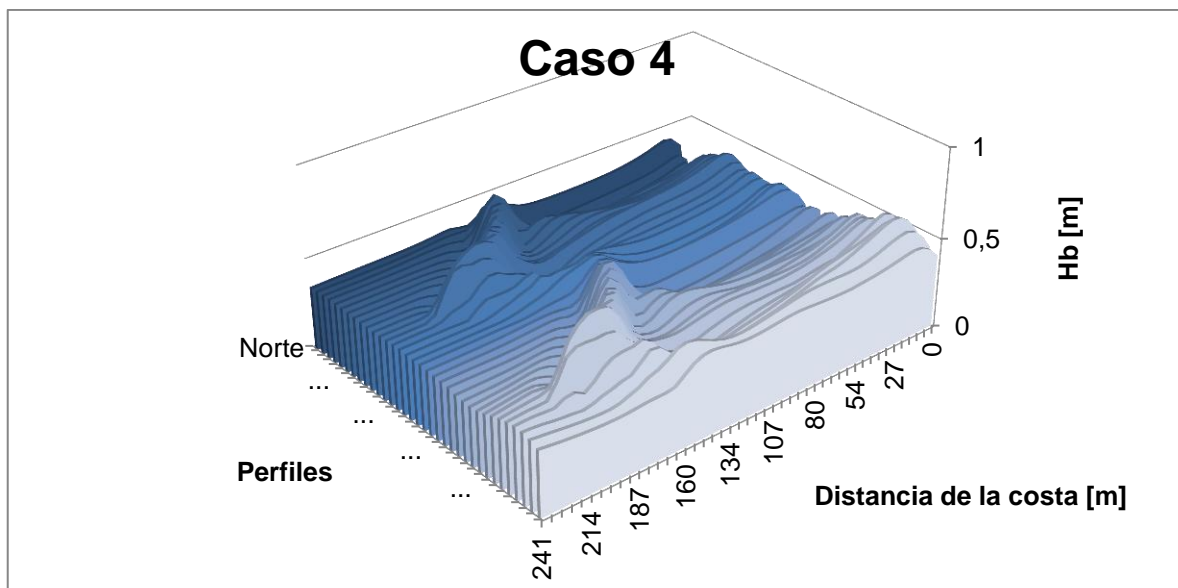
11.2 RESULTADOS MODELACIÓN



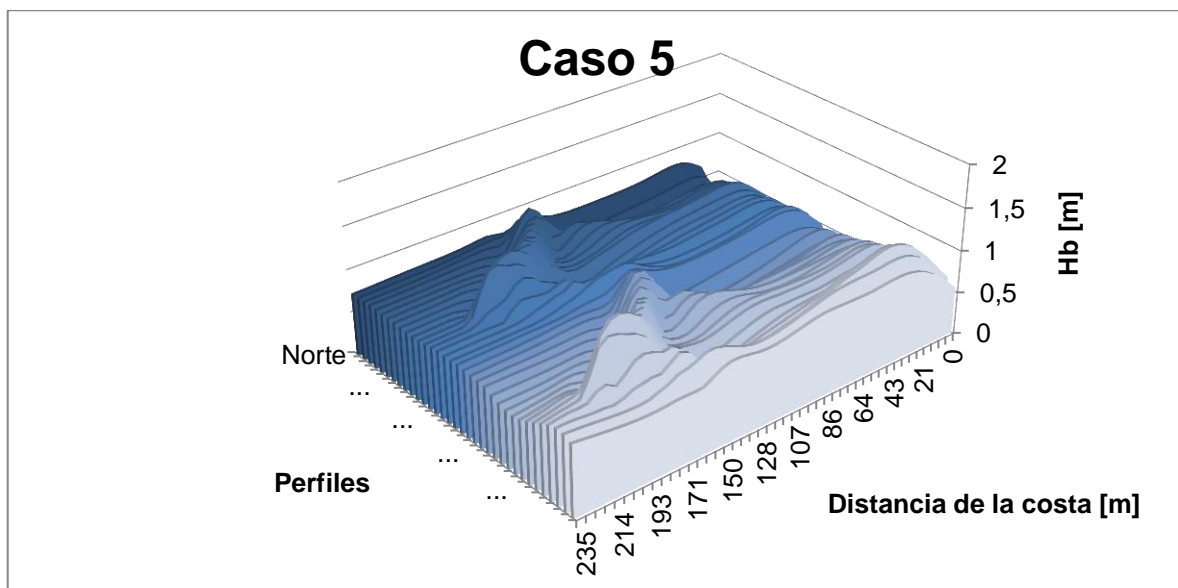
Fuente: Elaboración Propia



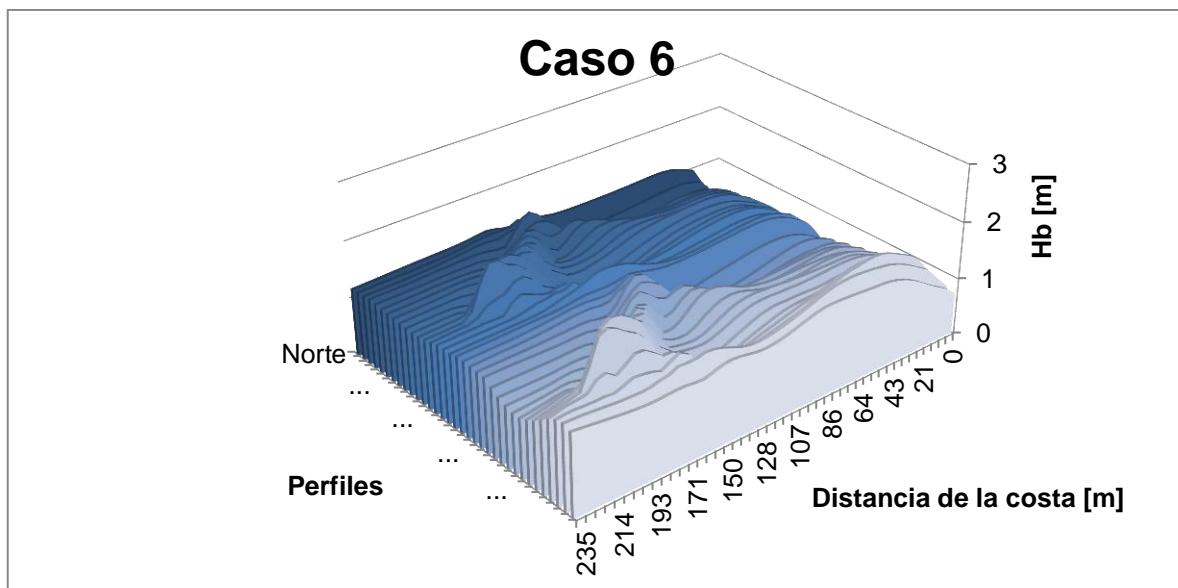
Fuente: Elaboración Propia



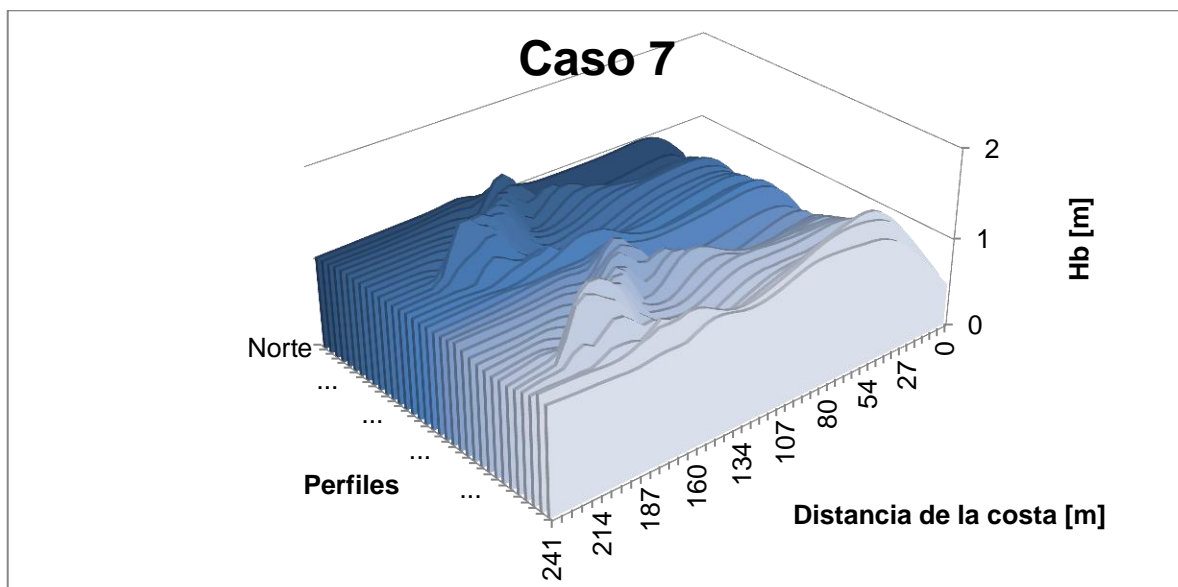
Fuente: Elaboración Propia



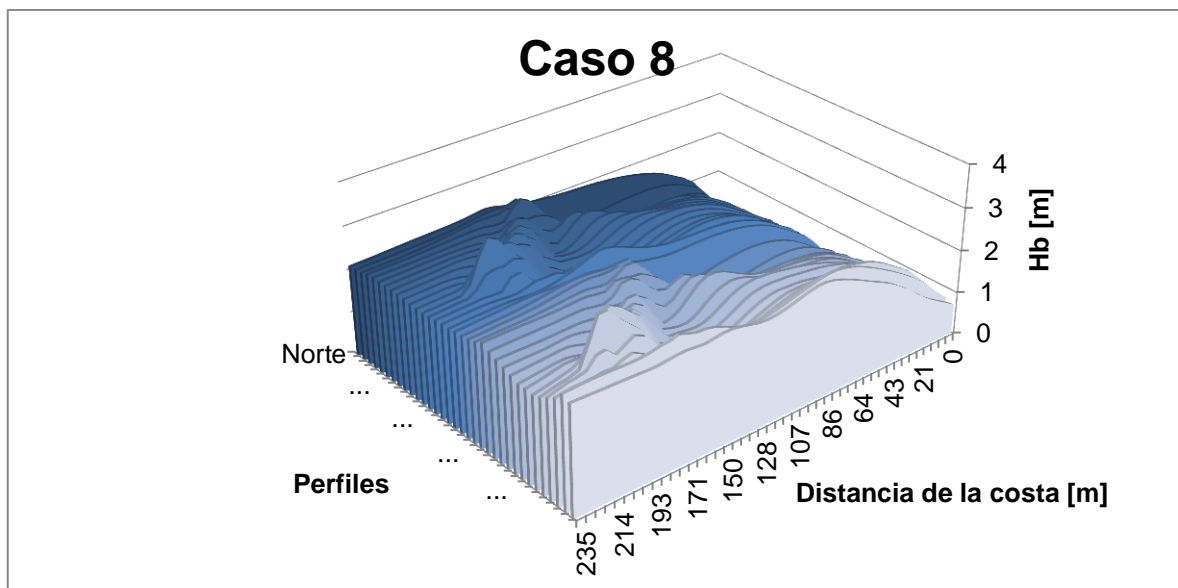
Fuente: Elaboración Propia



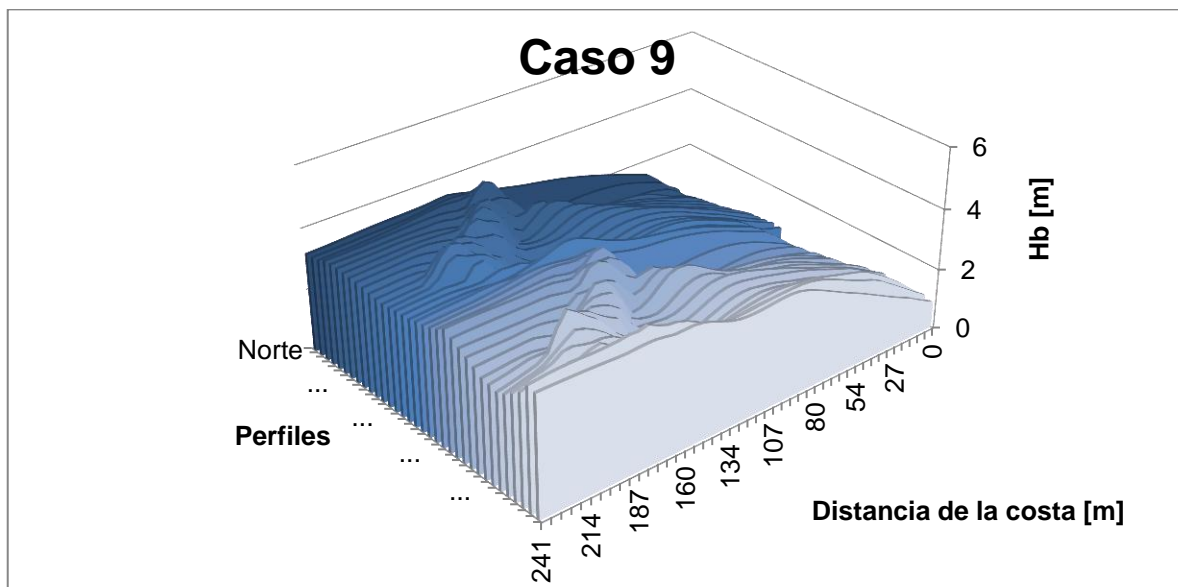
Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

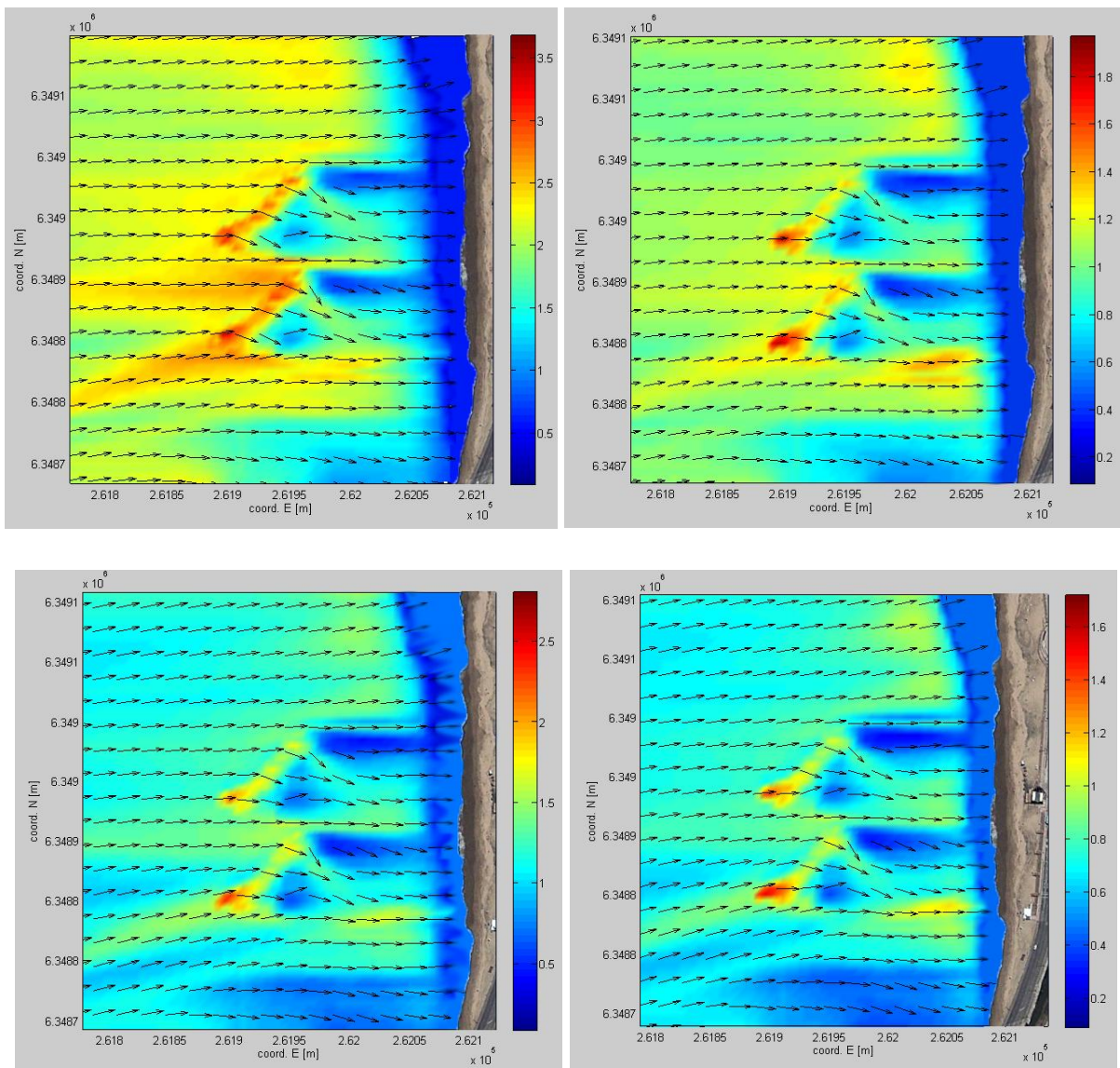


Fuente: Elaboración Propia

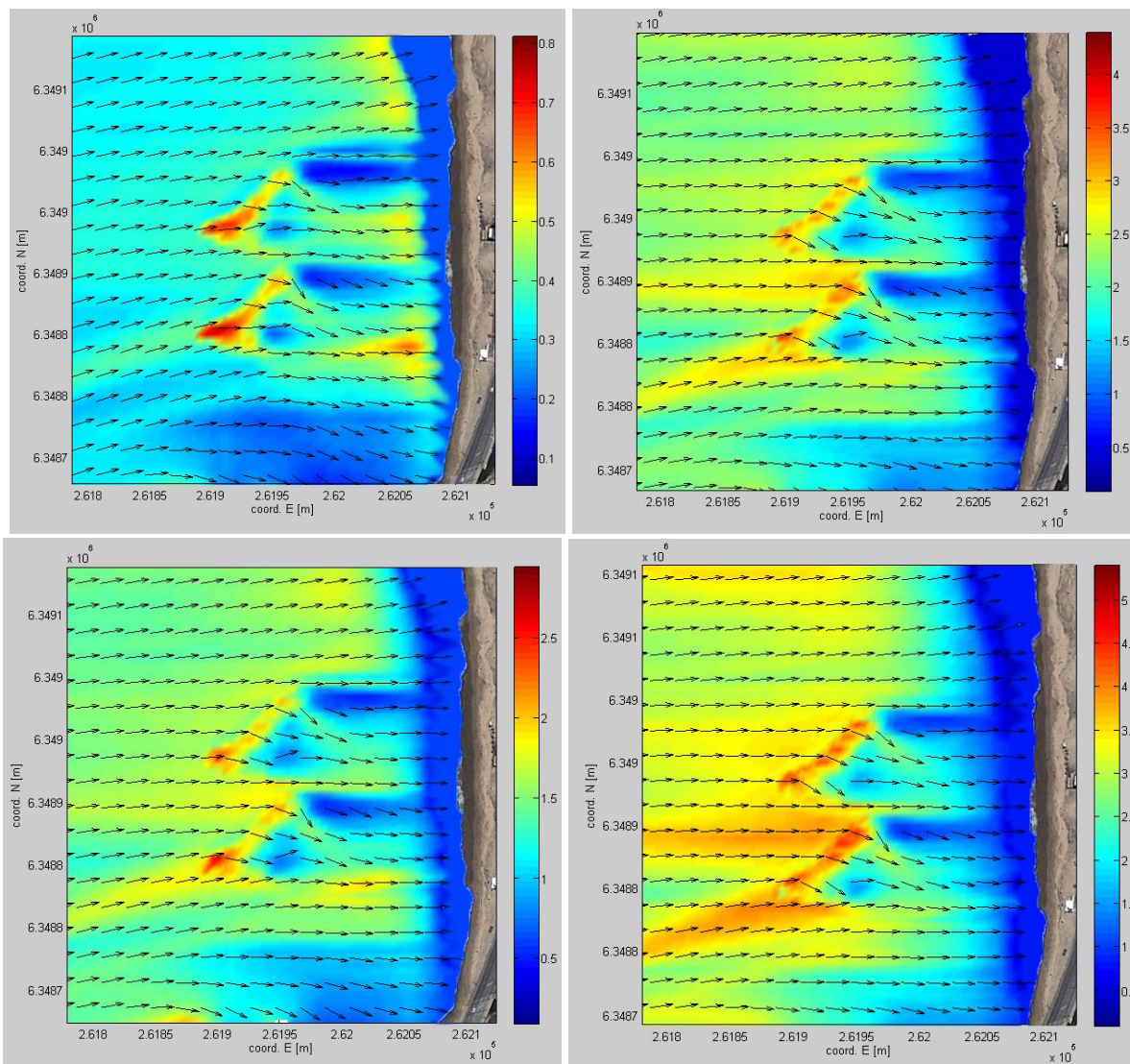


Fuente: Elaboración Propia

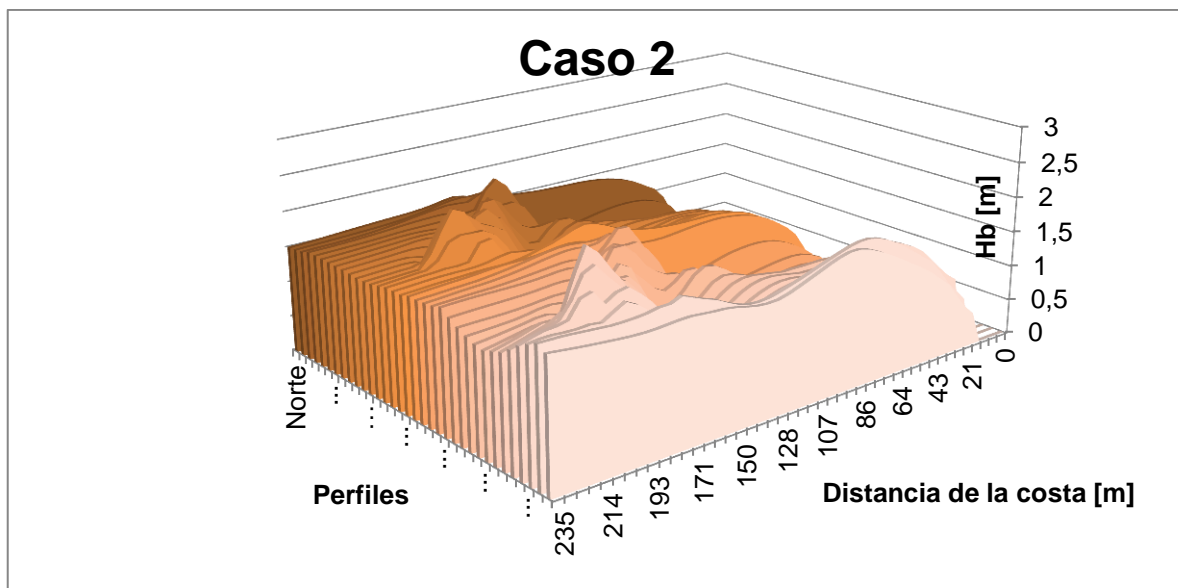
11.2.1 Modelación Marea Baja



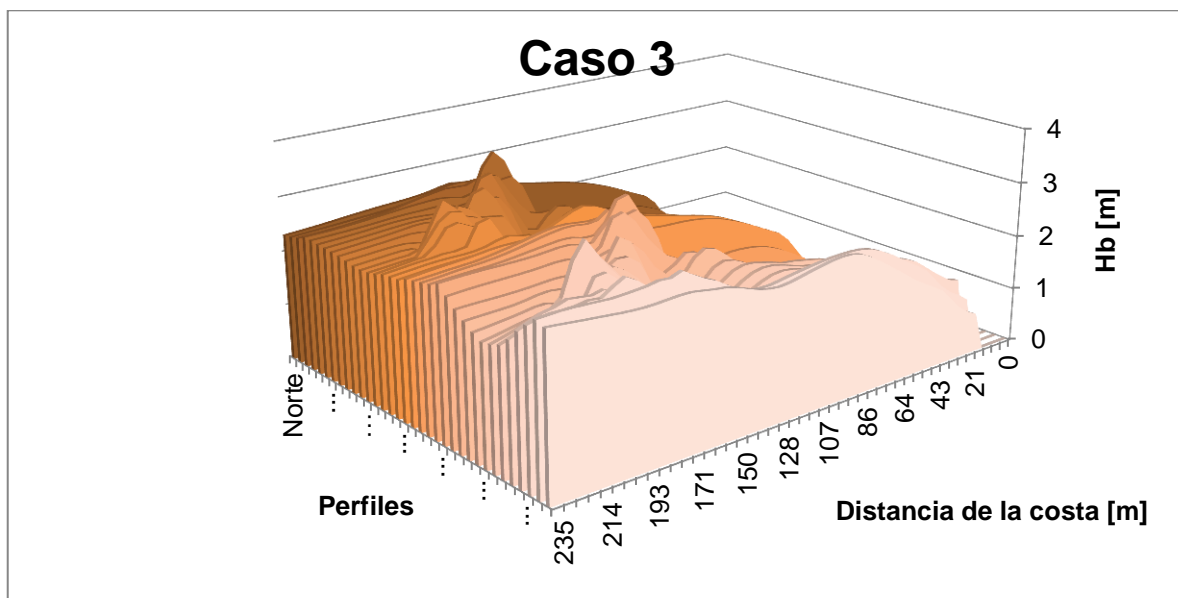
Fuente: Elaboración Propia



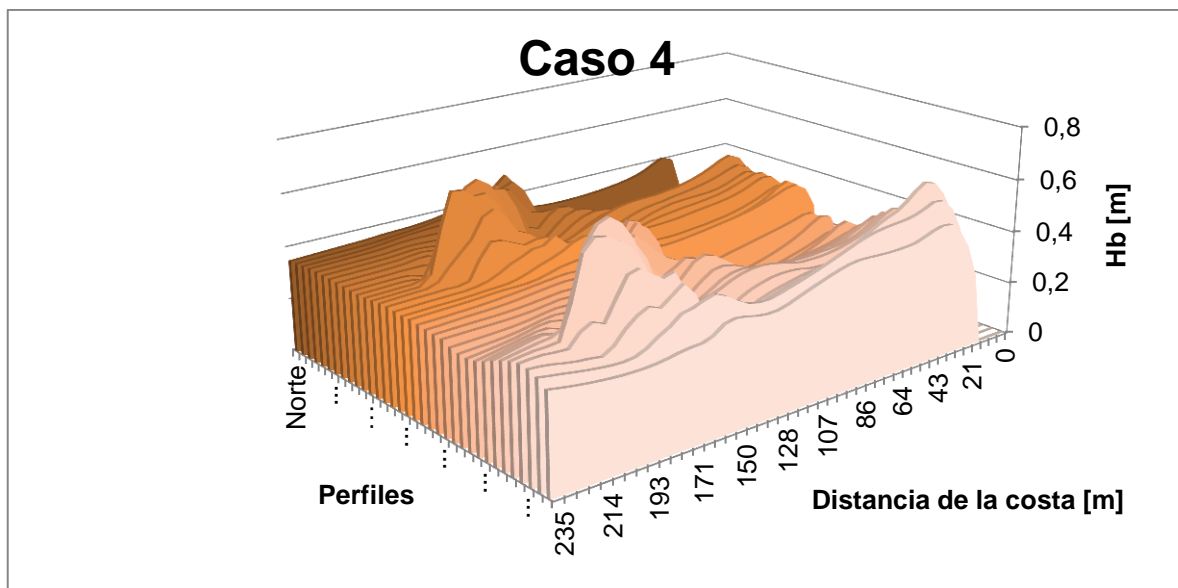
Fuente: Elaboración Propia



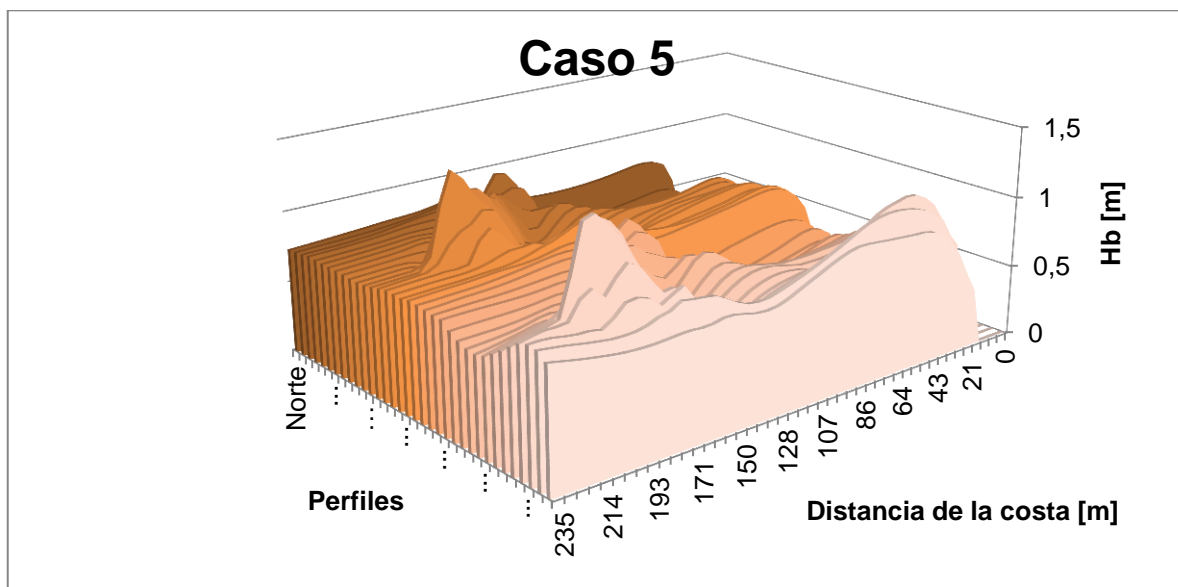
Fuente: Elaboración Propia



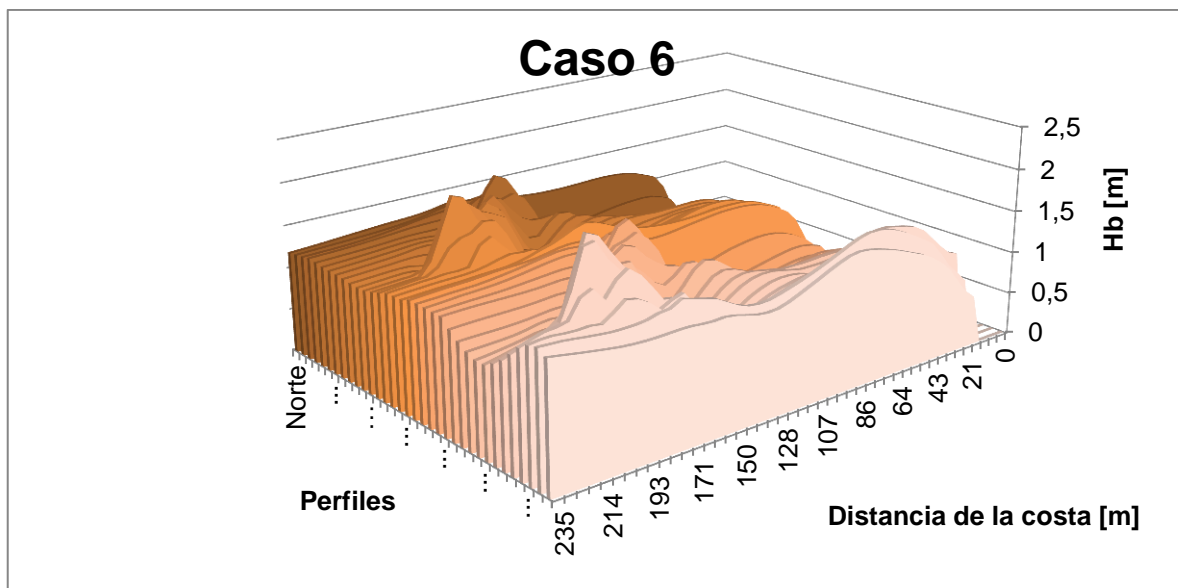
Fuente: Elaboración Propia



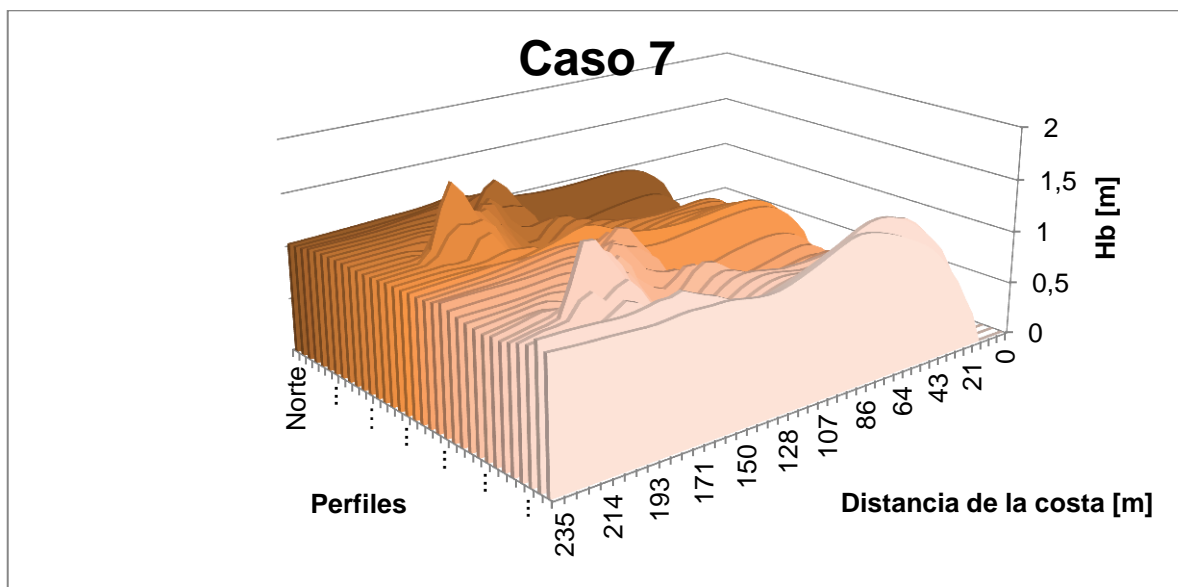
Fuente: Elaboración Propia



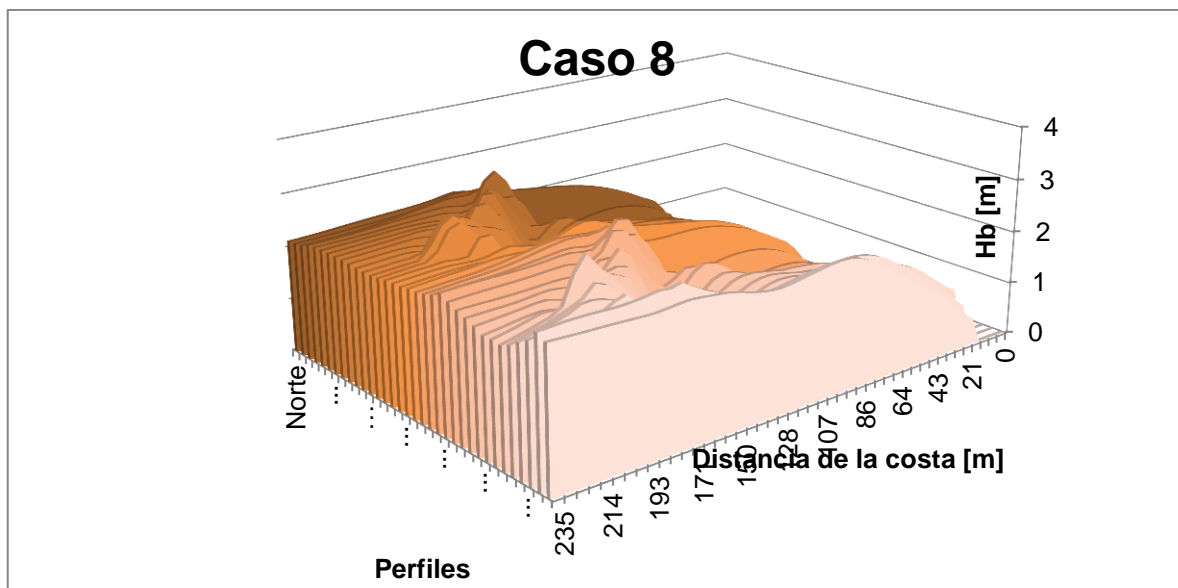
Fuente: Elaboración Propia



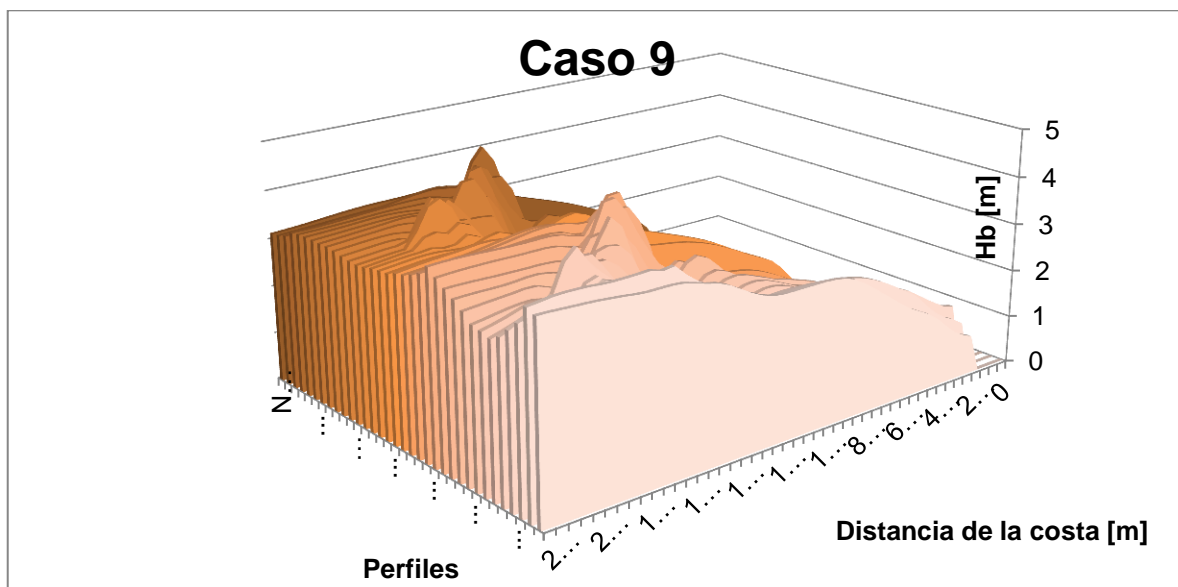
Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

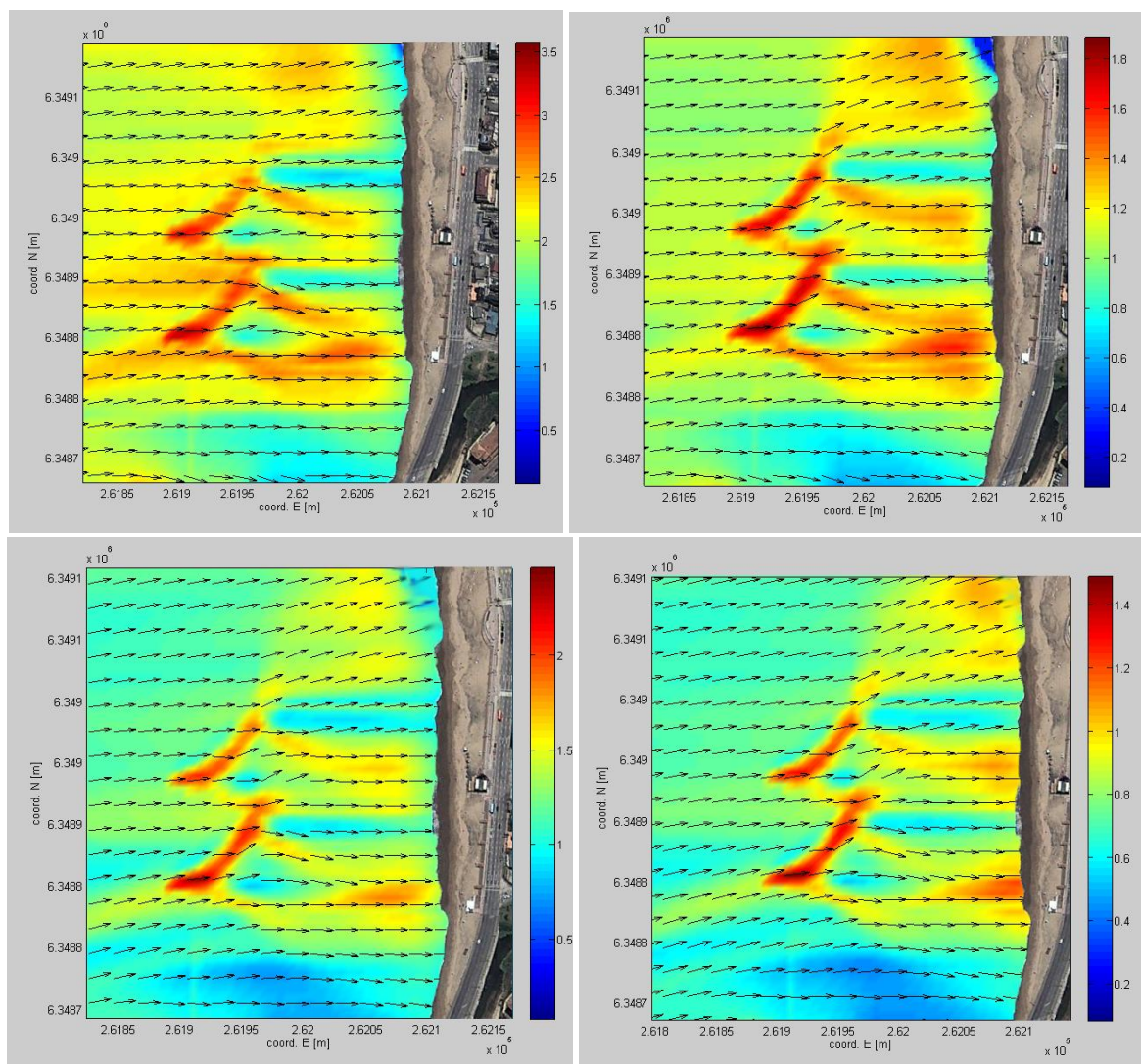


Fuente: Elaboración Propia

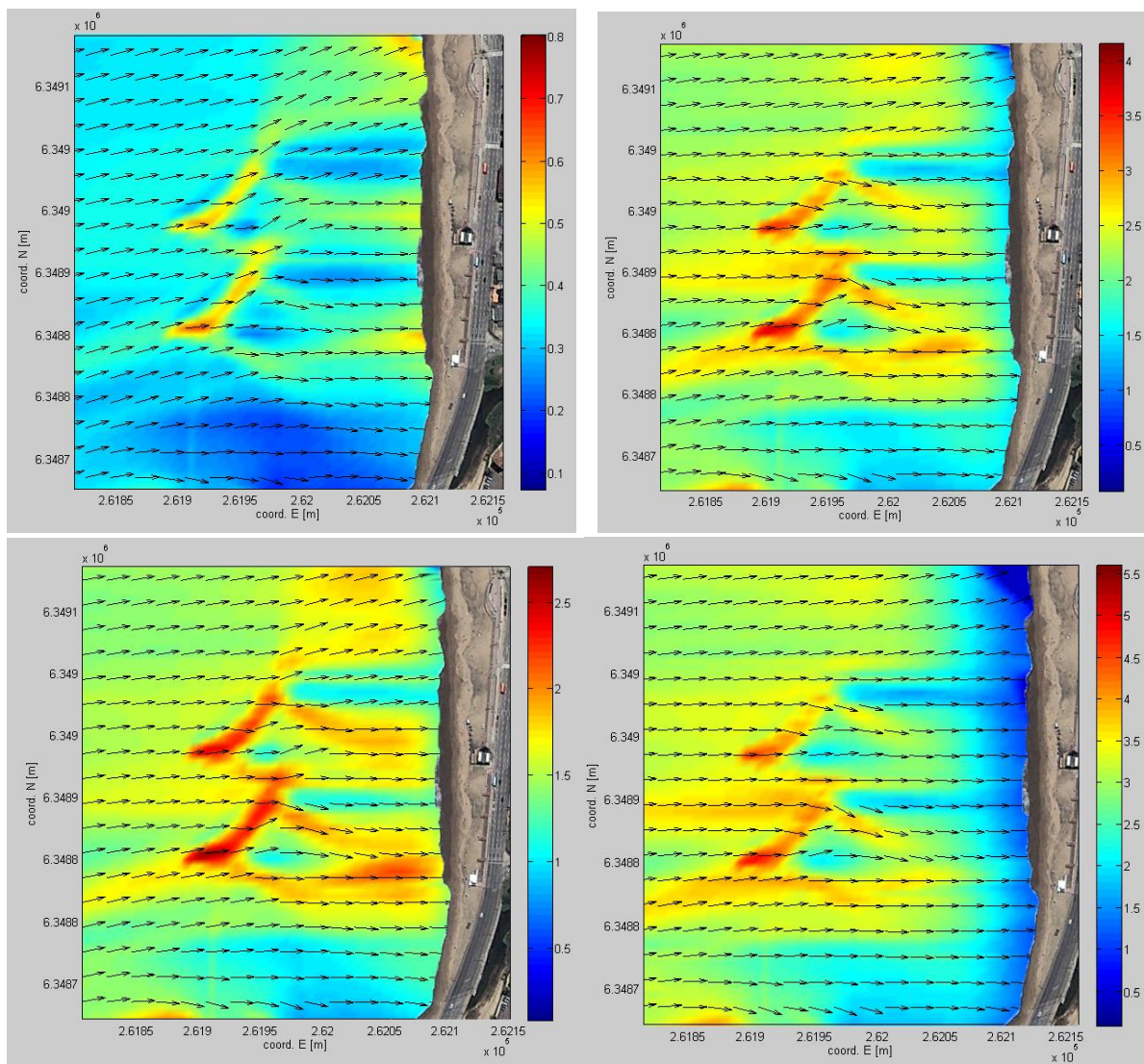


Fuente: Elaboración Propia

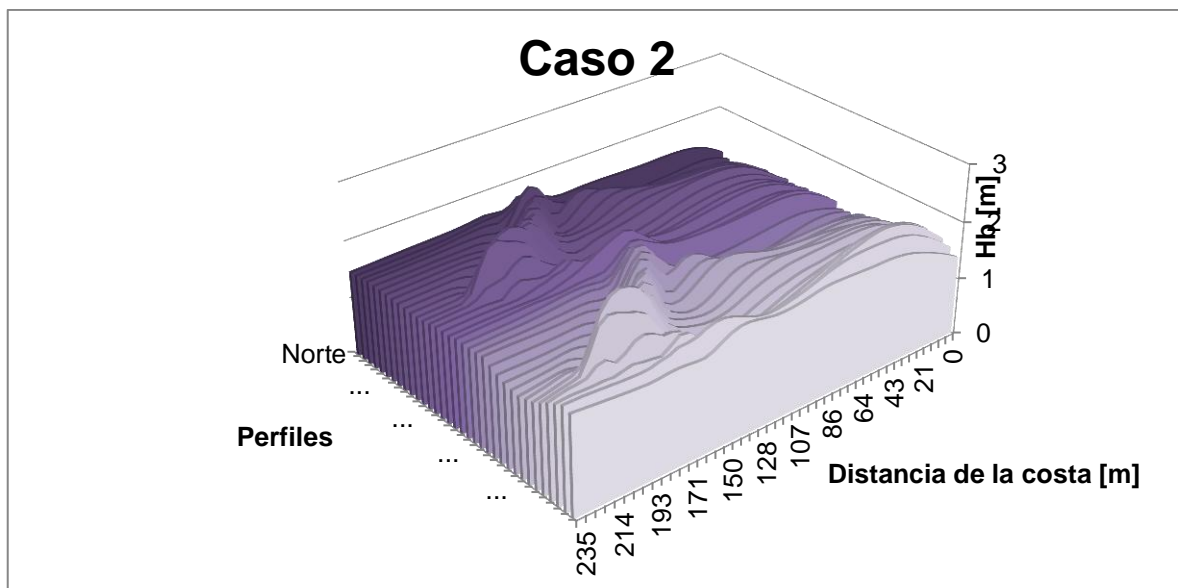
11.2.2 Modelación Marea Alta



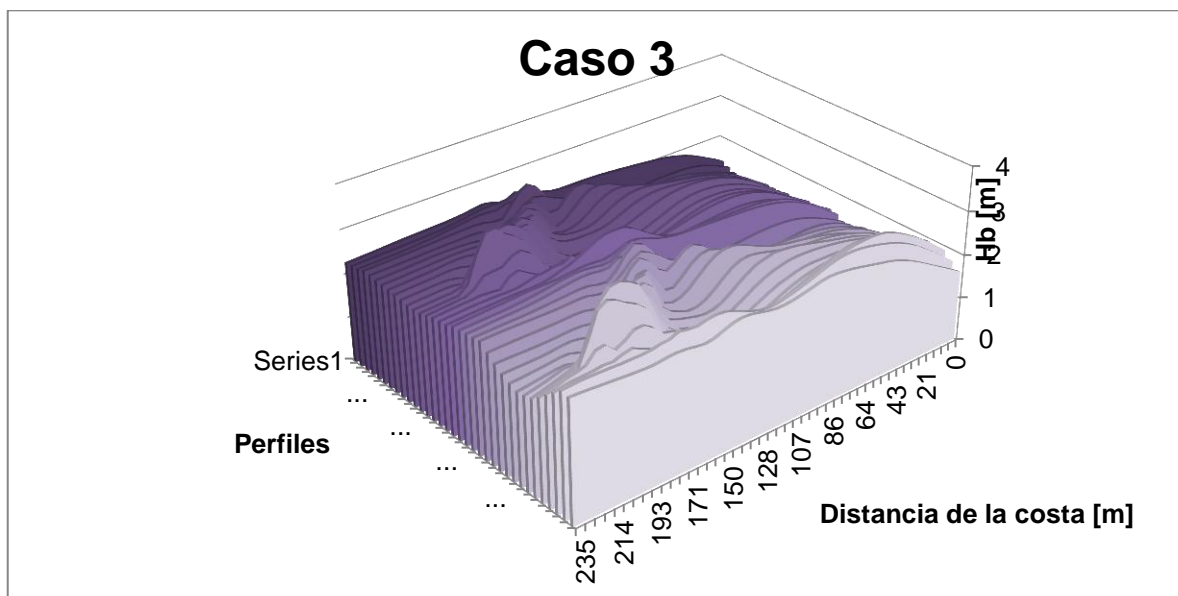
Fuente: Elaboración Propia



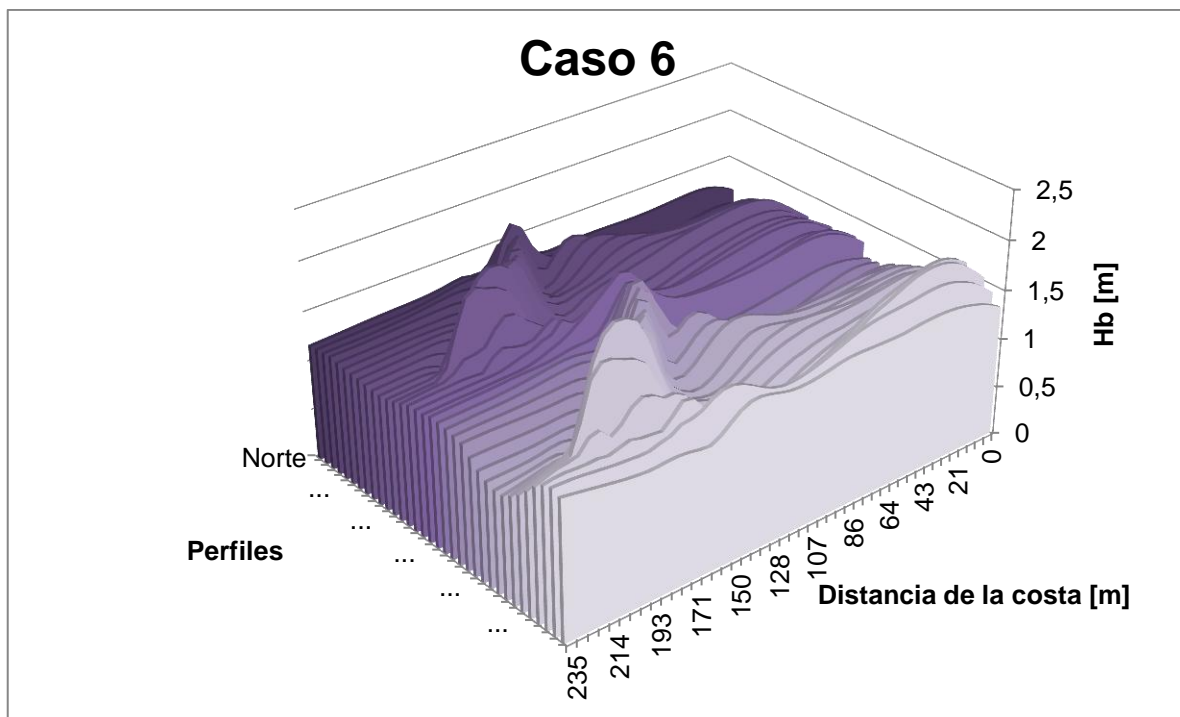
Fuente: Elaboración Propia



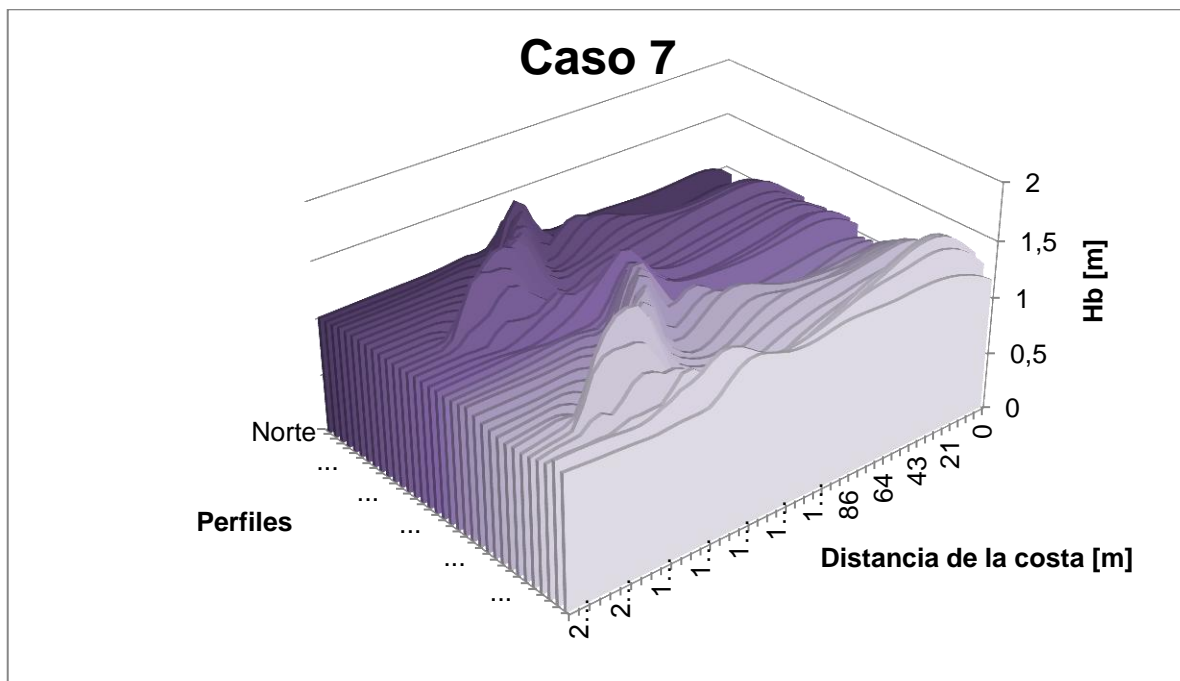
Fuente: Elaboración Propia



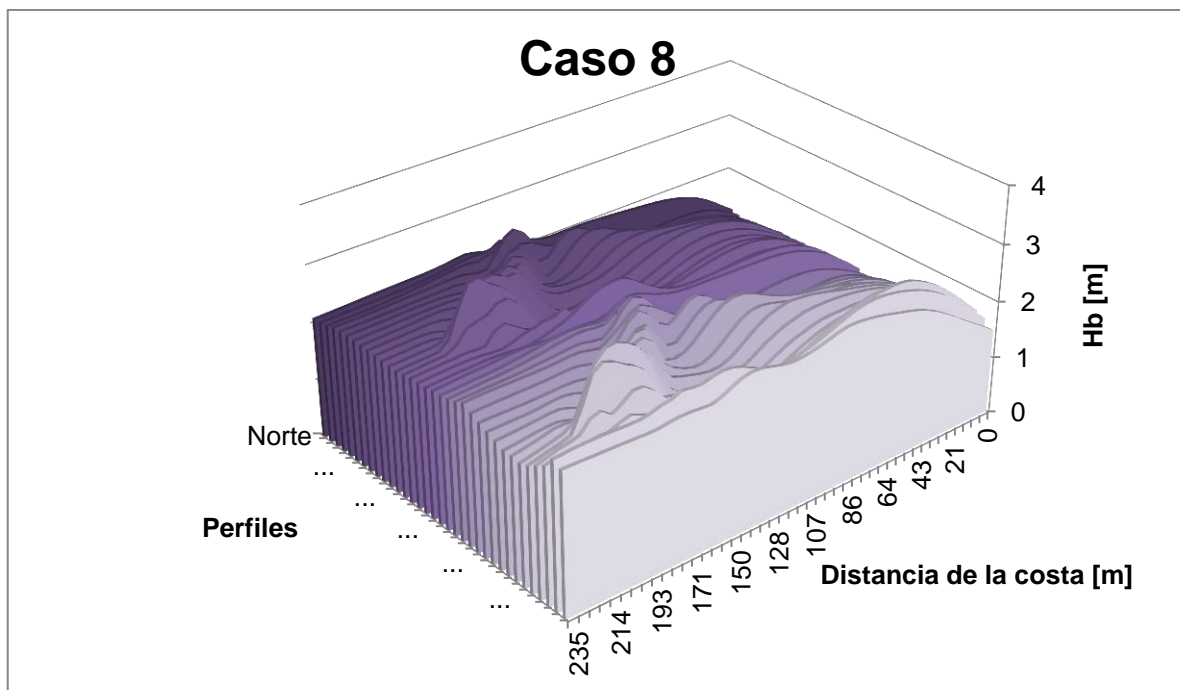
Fuente: Elaboración Propia



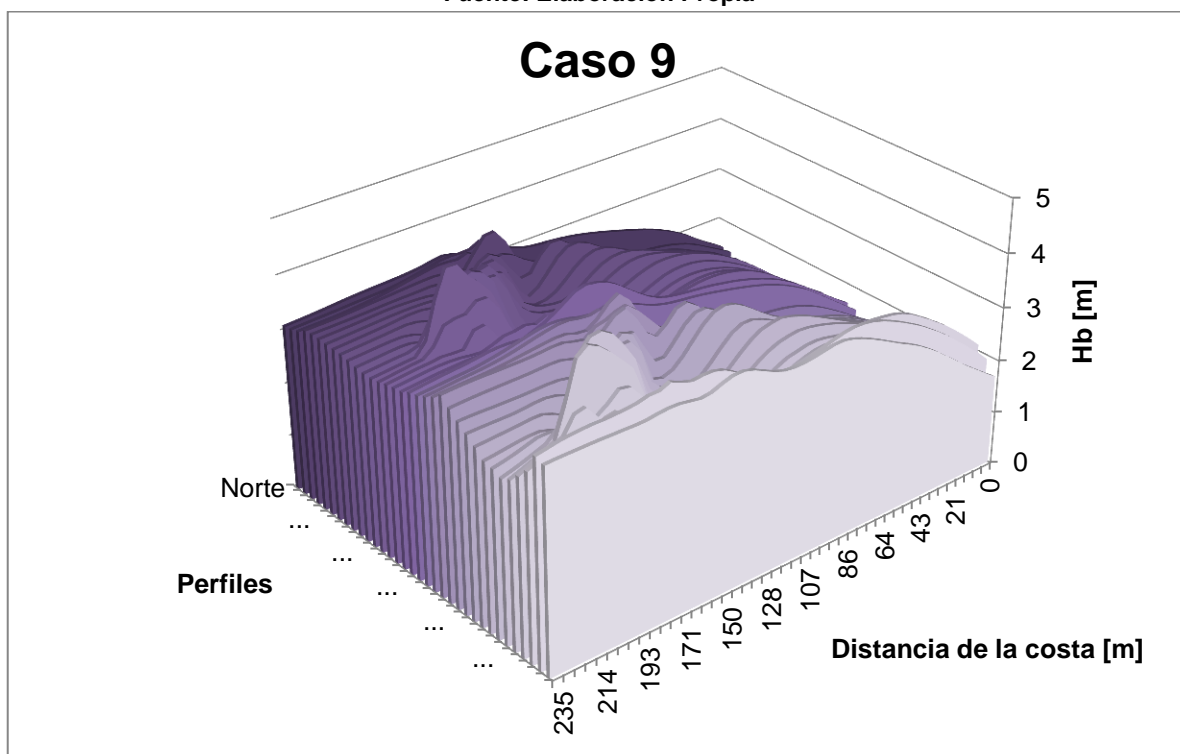
Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia



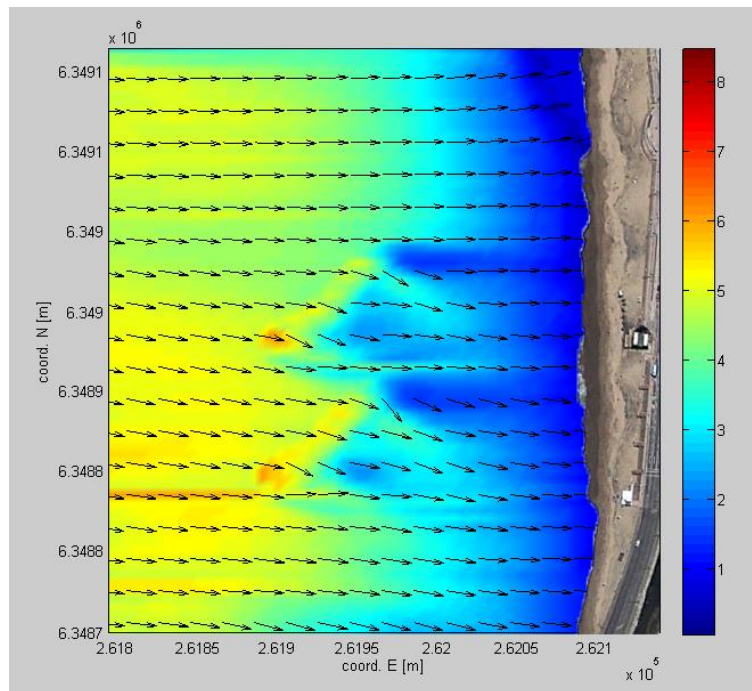
Fuente: Elaboración Propia



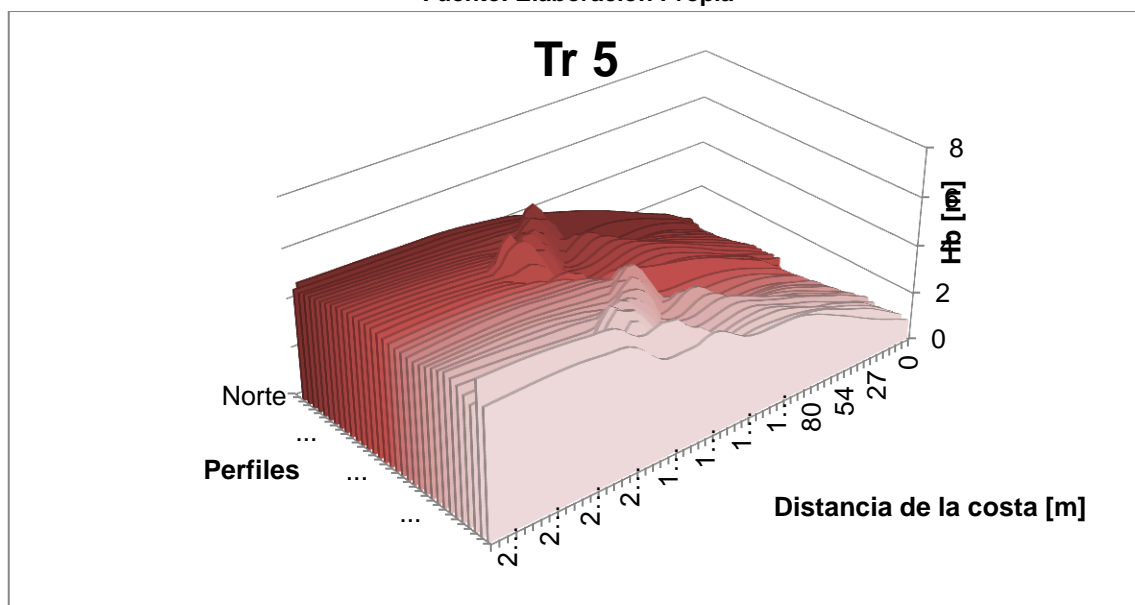
Fuente: Elaboración Propia

11.2.3 Modelación Clima Extremo

11.2.3.1 Tr 5

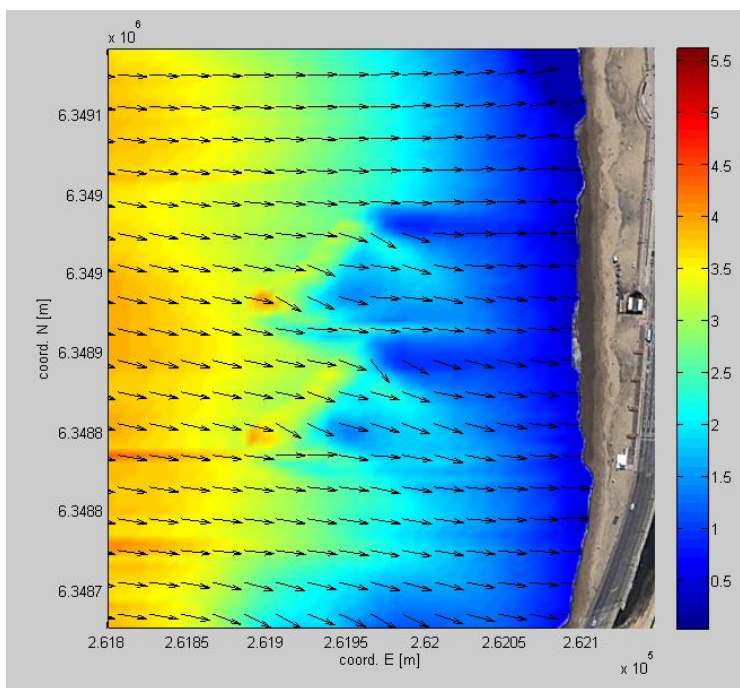


Fuente: Elaboración Propia

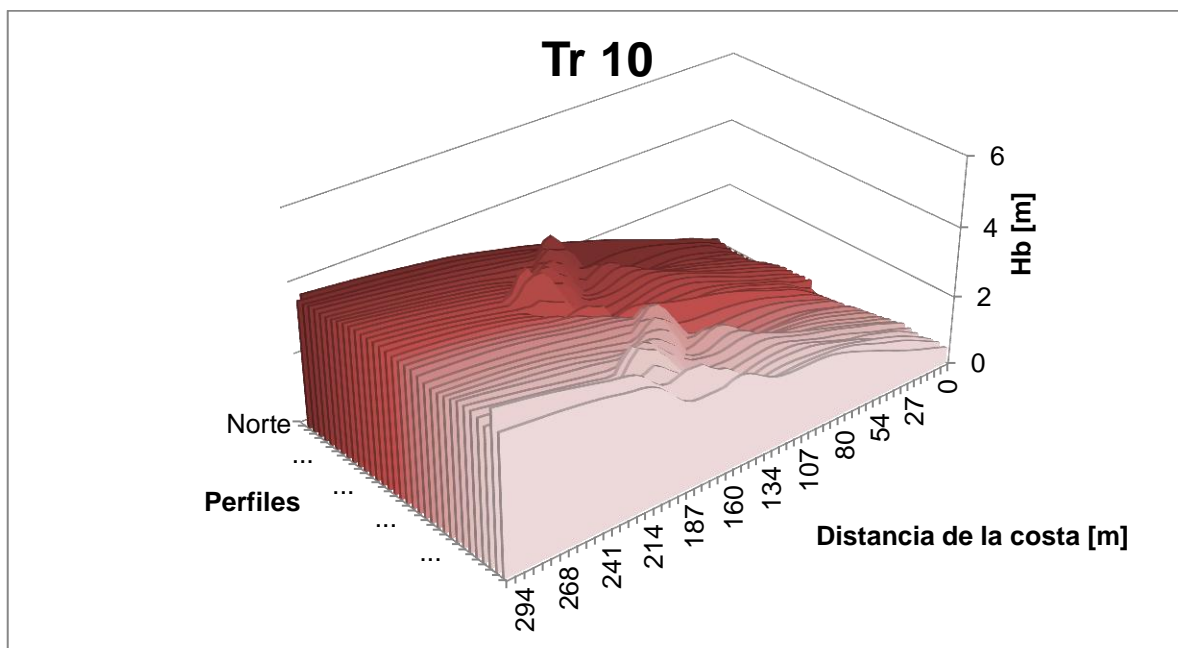


Fuente: Elaboración Propia

11.2.3.2 Tr 10

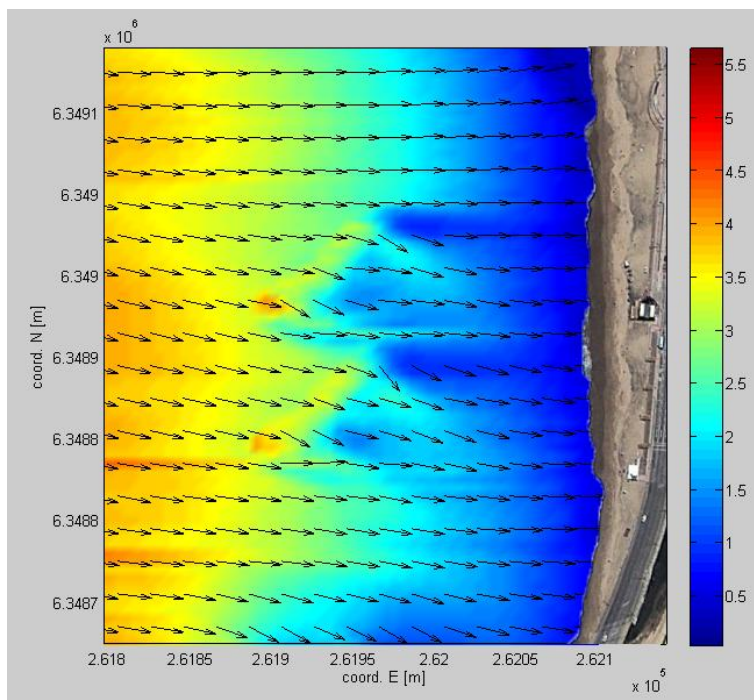


Fuente: Elaboración Propia

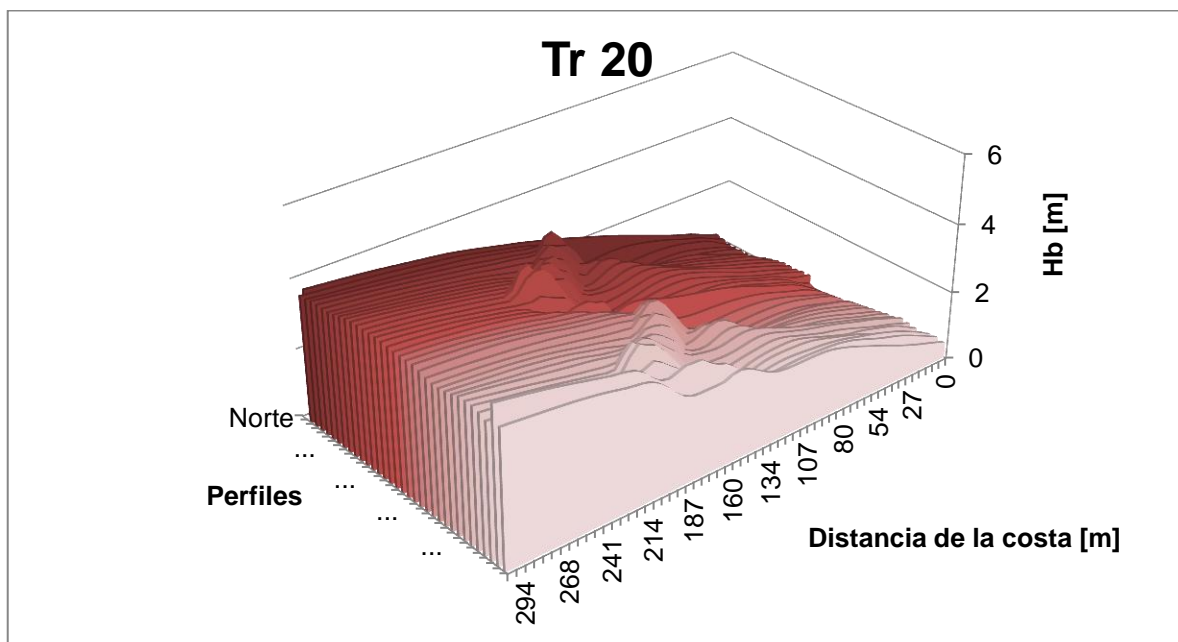


Fuente: Elaboración Propia

11.2.3.3 Tr 20

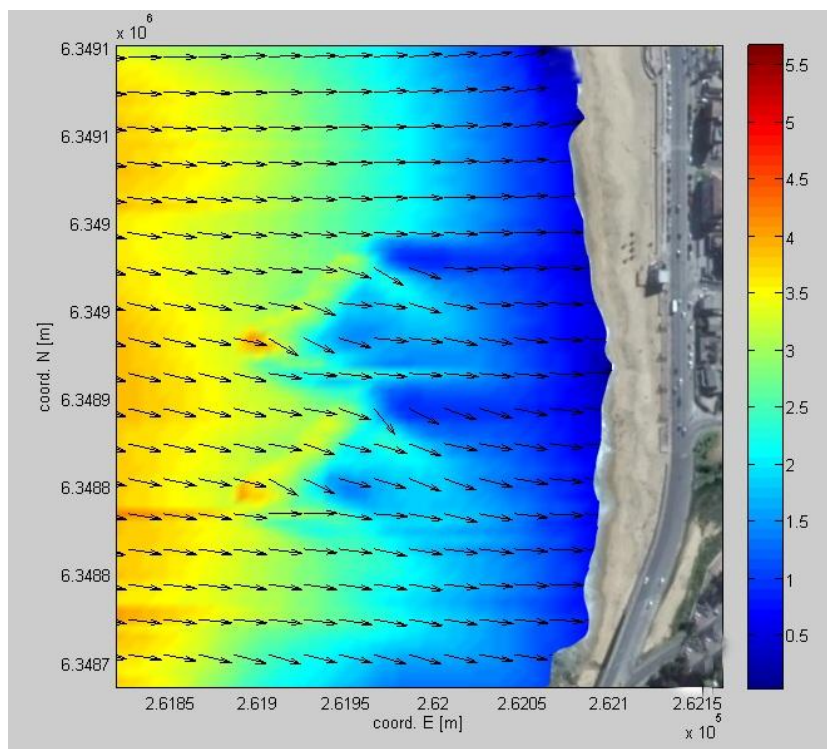


Fuente: Elaboración Propia

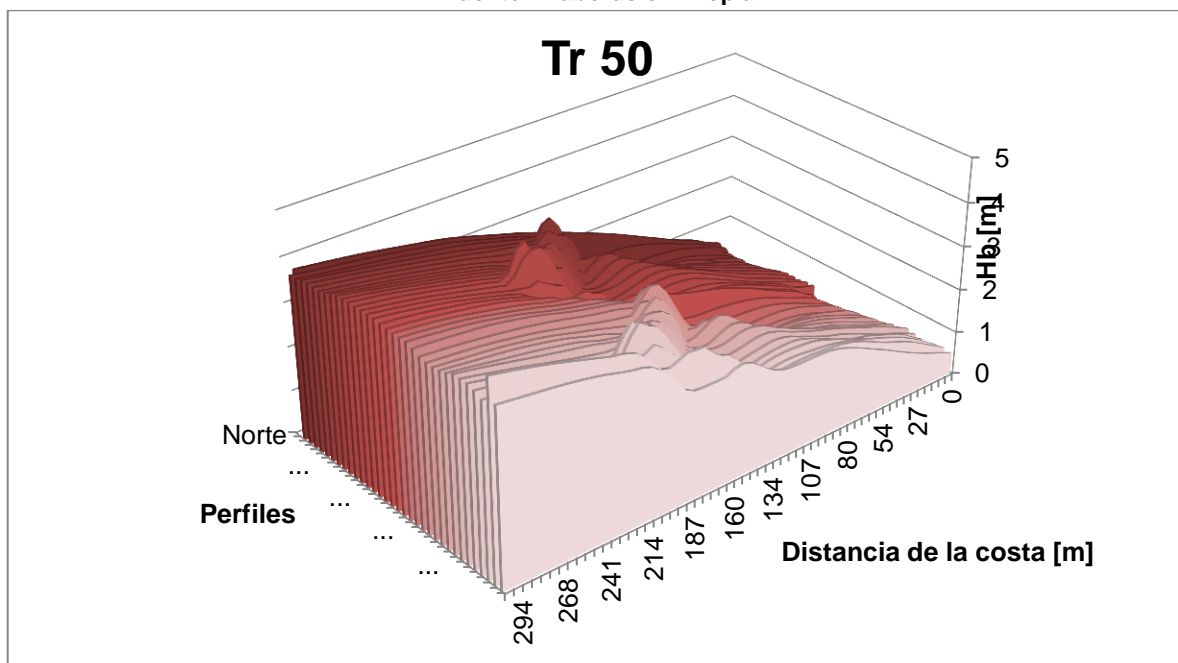


Fuente: Elaboración Propia

11.2.3.4 Tr 50



Fuente: Elaboración Propia



Fuente: Elaboración Propia

