



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

**“ESTUDIO DE EROSIÓN COSTERA Y REGENERACIÓN DE
ESPACIOS LITORALES. UNA APLICACIÓN EN PLAYA EL
PAPAGAYO, QUINTERO”**

MATÍAS FERNANDO QUEZADA LABRA

2007

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

"ESTUDIO DE EROSIÓN COSTERA Y REGENERACIÓN DE ESPACIOS LITORALES.
UNA APLICACIÓN EN PLAYA EL PAPAGAYO, QUINTERO"

MATÍAS FERNANDO QUEZADA LABRA

COMISIÓN REVISORA	CALIFICACIONES	
	Nota	Firma
PROFESOR GUÍA SR. PATRICIO WINCKLER		
PROFESOR CO-GUÍA SR. PATRICIO MONÁRDEZ		
PROFESOR INTEGRANTE SR. ERNESTO GÓMEZ		

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL OCEÁNICO

VIÑA DEL MAR, CHILE
2007

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 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 propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a sus derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

La base de datos de Olas Chile utilizada en el contexto de esta memoria, ha sido cedida a la Universidad de Valparaíso para fines académicos exclusivos de éste proyecto de título. El uso comercial de esta información por parte de terceros será de su responsabilidad y devengará eventualmente en el cobro de los derechos correspondientes.

Patricio Winckler Grez
Profesor Guía

Matías Fernando Quezada Labra
Alumno Memorista

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos personales en primera instancia a Don Patricio Monárdez Santander, por acceder gentilmente a aclarar mis dudas e incógnitas cada vez que lo solicité y guiarme en la realización de este documento. Además, quiero dejar plasmada la increíble voluntad de mi querida compañera Cindy Bernal Ponce, quien a pesar de su corta edad y poca experiencia en la carrera, ha enriquecido mi texto y mis exposiciones con sus comentarios y observaciones.

A Baird & Associates por facilitar la estadística de oleaje para el desarrollo de esta memoria.

Vayan también mis agradecimientos para Ramón Caballero, Hernán Sepúlveda y Joaquín Miranda, el grupo de buzos quienes de buena voluntad accedieron a explorar el fondo marino de Playa El Papagayo. Y también para Roberto Monardes quien bajo su mirada cultural y ambiental brindó buenas luces en el camino.

Agradezco al Profesor Patricio Winckler Grez por su diligencia ante la Universidad de Cantabria y conseguir una licencia de utilización del software Sistema de Modelado Costero (SMC) y también al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), por su facilitación de datos.

Gracias Ximena Vásquez por devolverle la sonrisa a mis labios y darme todo ese amor, que también siento por ti.

A mi familia, quienes infundieron en mí el rigor que guía mi transitar por la vida. Gracias a todos aquellos que a través del cariño y apoyo me han ayudado a conseguir el logro de terminar mis estudios profesionales que constituye el legado más grande que pudiera recibir.

Finalmente mis sentidos agradecimientos a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron en el desarrollo del documento y sus nombres se me han escapado.

Gracias a todos.
Matías Fernando Quezada Labra.

...el orden de los factores, no altera el producto...

*Dedicada a Nicanor Armando Quezada Bustamante,
quien a pesar de no estar presente en cuerpo
sí lo ha estado en alma durante toda mi carrera.*

*Nunca consideres el estudio como una obligación,
sino como una oportunidad para penetrar en el bello
y maravilloso mundo del saber.*

Albert Einstein

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1-1
2	OBJETIVOS.....	2-1
2.1	MOTIVACIÓN.....	2-1
2.2	OBJETIVO GENERAL.....	2-1
2.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2-1
3	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3-1
3.1	OLEAJE.....	3-1
3.1.1	DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ONDAS.....	3-1
3.1.2	PROPIEDADES DE LAS ONDAS.....	3-2
3.1.3	ECUACIONES GENERALES DEL MOVIMIENTO.....	3-4
3.1.4	DISCRIMINACIÓN DE LA VALIDEZ DE LAS TEORÍAS DE OLEAJE.....	3-6
3.2	TENSORES DE RADIACIÓN.....	3-8
3.3	TRANSFERENCIA ESPECTRAL DEL OLEAJE.....	3-10
3.3.1	TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE EN LA PROPAGACIÓN.....	3-10
3.3.2	DEFINICIÓN DE ESPECTROS.....	3-19
3.3.3	ESPECTROS DE FRECUENCIA MÁS UTILIZADOS.....	3-20
3.3.4	METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL.....	3-23
3.3.5	RECOMENDACIONES.....	3-24
3.4	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	3-25
3.4.1	SUPUESTOS.....	3-26
3.4.2	TRANSPORTE LONGITUDINAL.....	3-26
3.4.3	TRANSPORTE TRANSVERSAL.....	3-27
4	CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO.....	4-1
4.1	OLEAJE.....	4-1
4.1.1	GENERALIDADES.....	4-1
4.1.2	OLEAJE EN PLAYA EL PAPAGAYO.....	4-2
4.2	MAREAS.....	4-28
4.2.1	COMPONENTE ASTRONÓMICA.....	4-28
4.2.2	COMPONENTE METEOROLÓGICA.....	4-28
4.3	GRANULOMETRÍA.....	4-30
4.3.1	CAMPAÑA DE 1989.....	4-30
4.3.2	CAMPAÑA DE 2006.....	4-31
4.3.3	COMPARACIÓN DE AMBAS CAMPAÑAS.....	4-35
4.4	EXPLORACIÓN DEL FONDO MARINO.....	4-36
4.4.1	GENERALIDADES.....	4-36
4.4.2	RESULTADOS OBTENIDOS.....	4-37
4.4.3	COMENTARIOS GENERALES.....	4-41
4.5	FUNCIONAMIENTO MORFODINÁMICO.....	4-43
4.5.1	CLASIFICACIÓN DE LA PLAYA.....	4-43
4.6	ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	4-46
4.6.1	GENERALIDADES.....	4-46
4.6.2	MODELO NUMÉRICO MOPLA.....	4-46
4.6.3	MÉTODOS DE GABINETE.....	4-50
4.6.4	RESULTADOS OBTENIDOS.....	4-52
5	ESTUDIO DE EROSIÓN COSTERA.....	5-1
5.1	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PLAYA EL PAPAGAYO.....	5-1
5.2	EVOLUCIÓN EN PLANTA.....	5-11
5.2.1	BASE DE DATOS.....	5-11
5.2.2	ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE COSTA.....	5-13
5.3	ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE EROSIONADA.....	5-21
6	REGENERACIÓN DE PLAYA EL PAPAGAYO.....	6-1
6.1	PRESENTACIÓN.....	6-1

6.1.1	DEFINICIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.....	6-1
6.1.2	RESULTADOS ESPERADOS.....	6-5
6.2	BASES DE DISEÑO	6-7
6.2.1	VIDA ÚTIL.....	6-7
6.2.2	RIESGO	6-8
6.2.3	PERIODO DE RETORNO.....	6-9
6.3	PARÁMETROS DE DISEÑO	6-9
6.3.1	NIVEL DE MAREA.....	6-9
6.3.2	OLEAJE	6-9
6.3.3	HIDRODINÁMICA DEL PERFIL DE PLAYA.....	6-17
6.4	DESARROLLO DE LAS ALTERNATIVAS	6-20
6.4.1	FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO	6-20
6.4.2	DISEÑO ESTRUCTURAL ELEMENTOS DE PROTECCIÓN.....	6-24
6.5	SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA.....	6-32
6.6	DISEÑO DE LA NUEVA PLAYA EL PAPAGAYO	6-34
6.6.1	PLAYA DE ARENA	6-34
6.6.2	PLAYA DE PIEDRAS.....	6-38
6.7	ANÁLISIS EVOLUTIVO DE PLAYA EL PAPAGAYO.....	6-39
6.7.1	ANÁLISIS AL LARGO PLAZO	6-39
6.7.2	ANÁLISIS AL CORTO PLAZO.....	6-45
6.8	CUBICACIÓN PROYECTOS DE REGENERACIÓN	6-50
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	7-1
7.1	RESPECTO DE LA CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO	7-1
7.2	RESPECTO DEL ESTUDIO DE EROSIÓN	7-1
7.3	RESPECTO DEL PROYECTO DE REGENERACIÓN	7-1
7.4	RECOMENDACIONES GENERALES.....	7-2
8	ANEXOS	8-1
8.1	ANEXO I: RESULTADOS DE LA GRANULOMETRÍA.....	8-2
8.1.1	METODOLOGÍA	8-3
8.1.2	UBICACIÓN DE LAS TOMA DE MUESTRAS	8-3
8.2	ANEXO II: ECUACIONES DE GOBIERNO DE MOPLA	8-23
8.2.1	GENERALIDADES.....	8-24
8.2.2	ECUACIONES DE GOBIERNO DE OLUCA –SP	8-24
8.2.3	ECUACIONES DE GOBIERNO DE COPLA – SP	8-26
8.2.4	ECUACIONES DE GOBIERNO DE EROS – SP	8-26
8.3	ANEXO III: HEMEROTECA.....	8-27

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: RESUMEN FUERZAS GENERADORAS Y RESTAURADORAS DEL OLEAJE.....	3-2
TABLA 2: RESUMEN DE CONDICIONES DE BORDE PARA LAS DIFERENTES TEORÍAS DE OLEAJE.....	3-5
TABLA 3: CLASIFICACIÓN DE ROMPIENTES SEGÚN NÚMERO DE IRIBARREN.....	3-18
TABLA 4: TABLA DE INCIDENCIA DE OLEAJE DE ALTURA Y PERIODO, COSTA AFUERA (VALPARAÍSO).....	4-3
TABLA 5: TABLA DE INCIDENCIA DE OLEAJE DE ALTURA Y DIRECCIÓN, COSTA AFUERA (VALPARAÍSO).....	4-4
TABLA 6: TABLA DE INCIDENCIA DE OLEAJE DE PERIODO Y DIRECCIÓN, COSTA AFUERA (VALPARAÍSO).....	4-5
TABLA 7: ORIENTACIONES DE LAS GRILLAS NUMÉRICAS EMPLEADAS.....	4-8
TABLA 8: DIRECCIONES INCIDENTES DE OLEAJE PROPAGADAS.....	4-10
TABLA 9: COORDENADAS DEL PUNTO DE EXTRACCIÓN DE DATOS (NODO 1).....	4-15
TABLA 10: TABLA DE INCIDENCIA DE OLEAJE DE ALTURA Y PERIODO PARA LA PLAYA EL PAPAGAYO.....	4-19
TABLA 11: TABLA DE INCIDENCIA DE OLEAJE DE ALTURA Y DIRECCIÓN PARA LA PLAYA EL PAPAGAYO.....	4-20
TABLA 12: TABLA DE INCIDENCIA DE OLEAJE DE PERIODO Y DIRECCIÓN PARA LA PLAYA EL PAPAGAYO.....	4-21
TABLA 13: PLANOS MAREALES PARA QUINTERO SEGÚN PRONÓSTICOS DESDE 2003 A 2005.....	4-28
TABLA 14: CORRECCIÓN POR PRESIÓN ATMOSFÉRICA.....	4-29
TABLA 15: RESUMEN DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA CADA MUESTRA.....	4-30
TABLA 16: RESULTADOS ENSAYES DE LABORATORIO.....	4-33
TABLA 17: DIÁMETROS UTILIZADOS PARA LA DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DE SEDIMENTO.....	4-35
TABLA 18: RESUMEN DE MODELOS NUMÉRICOS INCLUIDOS EN MOPLA.....	4-47
TABLA 19: VALORES DE HMO, TP Y DIR PARA EL CÁLCULO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	4-47
TABLA 20: RESULTADOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DESDE EL MODELO MOPLA.....	4-57
TABLA 21: RESULTADOS DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA LOS MÉTODOS DE GABINETE.....	4-59
TABLA 22: FOTOGRAFÍAS ÁREAS DISPONIBLES.....	5-11
TABLA 23: COMPARACIÓN DE RESULTADOS CONSIDERANDO LA MUESTRA PPY – EQ.....	5-22
TABLA 24: VIDA ÚTIL MÍNIMA RECOMENDADA.....	6-7
TABLA 25: RIESGOS MÁXIMOS ADMISIBLES.....	6-8
TABLA 26: LISTA DE MÁXIMOS ANUALES EN 20 AÑOS DE ESTADÍSTICA, 3º CUADRANTE.....	6-10
TABLA 27: LISTA DE MÁXIMOS ANUALES EN 20 AÑOS DE ESTADÍSTICA, 4º CUADRANTE.....	6-11
TABLA 28: OLEAJE DE DISEÑO EN EL PUNTO DE EXTRACCIÓN POR CUADRANTE.....	6-14
TABLA 29: ALTURA DE OLA PROGRESIVA PARA $T_r = 100$ AÑOS AL PIE DE LA OBRA.....	6-17
TABLA 30: $H_{80.137}$ DE ACUERDO AL CUADRANTE ANALIZADO, PARA 20 AÑOS DE ESTADÍSTICA (NODO 1).....	6-18
TABLA 31: ZONIFICACIÓN DEL PERFIL PARA LA CONDICIÓN ACTUAL.....	6-18
TABLA 32: COEFICIENTES DE TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE.....	6-20
TABLA 33: CASOS DE DIQUES SUMERGIDOS A SENSIBILIZAR.....	6-23
TABLA 34: CASOS DE DIQUES ARRECIFES A SENSIBILIZAR.....	6-24
TABLA 35: CARACTERÍSTICAS DE REEF BALL DISPONIBLES EN EL MERCADO.....	6-25
TABLA 36: RESUMEN DE DISEÑO DIQUE SUMERGIDO, PARA OLEAJE EXTREMO.....	6-27
TABLA 37: RESUMEN DE DISEÑO DIQUE SUMERGIDO, PARA OLEAJE ROMPIENTE.....	6-28
TABLA 38: RESUMEN DE DISEÑO DIQUE ARRECIFE, PARA OLEAJE EXTREMO.....	6-30
TABLA 39: RESUMEN DE DISEÑO DIQUE ARRECIFE, PARA OLEAJE ROMPIENTE.....	6-31
TABLA 40: CUBICACIÓN Y PRESUPUESTO ESTIMATIVO POR ML CONSTRUIDO.....	6-32
TABLA 41: CASOS DE OLEAJE EMPLEADOS COMBINANDO ALTURA Y PERIODO.....	6-34
TABLA 42: RESUMEN DE CASOS QUE EROSIONA EN ALGÚN GRADO LA PLAYA.....	6-41
TABLA 43: TORMENTAS PARA EL ANÁLISIS AL CORTO PLAZO, EN EL NODO 1.....	6-46
TABLA 44: COSTO DE PROYECTOS DE REGENERACIÓN SIN CONSIDERAR MATERIAL EXISTENTE.....	6-50
TABLA 45: COSTO DE PROYECTOS DE REGENERACIÓN CONSIDERANDO MATERIAL EXISTENTE.....	6-51
TABLA 46: RESUMEN DE POSICIÓN DE MUESTRAS.....	8-4

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: UBICACIÓN DE QUINTERO.....	1-1
ILUSTRACIÓN 2: UBICACIÓN DE PLAYA EL PAPAGAYO.....	1-2

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CLASIFICACIÓN DE LAS OLAS.	3-1
FIGURA 2: REPRESENTACIÓN SIMPLIFICADA DE UNA ONDA.	3-3
FIGURA 3: CARACTERÍSTICAS ADICIONALES DE UNA ONDA.	3-3
FIGURA 4: GRÁFICO PARA DISCRIMINAR LA VALIDEZ DE LAS TEORÍAS (LE MÉHAUTÉ 1976).	3-8
FIGURA 5: DIRECCIONES DE CÁLCULO DE LOS TENSORES DE RADIACIÓN.	3-9
FIGURA 6: ESQUEMA DE UNA OLA REFRACTADA.	3-12
FIGURA 7: DIFRACCIÓN PARA UN DIQUE SEMI INFINITO CON INCIDENCIA OBLICUA DEL OLAJE.	3-13
FIGURA 8: ROMPIENTE TIPO SPILLING.	3-17
FIGURA 9: ROMPIENTE TIPO PLUNGING.	3-17
FIGURA 10: ROMPIENTE TIPO COLLAPSING.	3-18
FIGURA 11: ROMPIENTE TIPO SURFING.	3-18
FIGURA 12: EJEMPLO DE ESPECTRO DE FRECUENCIA.	3-19
FIGURA 13: EJEMPLO DE ESPECTRO DIRECCIONAL.	3-20
FIGURA 14: PARÁMETRO DEL DIÁMETRO DEL GRANO V/S EL PARÁMETRO DE SHIELDS.	3-25
FIGURA 15: ESQUEMA GENERAL PARA EL DESARROLLO DE OLAJE.	4-1
FIGURA 16: UBICACIÓN NODO DE ESTADÍSTICAS EN AGUAS PROFUNDAS.	4-2
FIGURA 17: ROSA DE ALTURA OLAJE COSTA AFUERA (VALPARAÍSO).	4-6
FIGURA 18: ROSA DE PERIODO OLAJE COSTA AFUERA (VALPARAÍSO).	4-7
FIGURA 19: ESQUEMA DE EMPLAZAMIENTO DE LAS GRILLAS DE PROPAGACIÓN.	4-9
FIGURA 20: GRILLA ANIDADA PARA EL MODELO SW.	4-11
FIGURA 21: GRILLA ANIDADA PARA EL MODELO W.	4-12
FIGURA 22: GRILLA ANIDADA PARA EL MODELO NW.	4-13
FIGURA 23: PROPAGACIÓN DE OLAJE $H_{m0} = 1$ [M], $T_p = 14$ [s], $DIR = 225^\circ$	4-14
FIGURA 24: PROPAGACIÓN DE OLAJE $H_{m0} = 1$ [M], $T_p = 14$ [s], $DIR = 270^\circ$	4-14
FIGURA 25: PROPAGACIÓN DE OLAJE $H_{m0} = 1$ [M], $T_p = 14$ [s], $DIR = 315^\circ$	4-15
FIGURA 26: UBICACIÓN PUNTO DE EXTRACCIÓN DE DATOS (NODO 1).	4-16
FIGURA 27: ROSA DE ALTURA DE OLAJE PARA LA PLAYA EL PAPAGAYO.	4-22
FIGURA 28: ROSA DE PERIODO DE OLAJE PARA LA PLAYA EL PAPAGAYO.	4-23
FIGURA 29: UBICACIÓN DE LOS PERFILES.	4-32
FIGURA 30: LÍNEAS DE SONDEO SUBMARINO.	4-37
FIGURA 31: ESQUEMA DE CLASIFICACIÓN DEL FONDO MARINO.	4-42
FIGURA 32: PUNTOS DE ENCAJONAMIENTO DE PLAYA EL PAPAGAYO.	4-43
FIGURA 33: UBICACIÓN DE LAS FUENTES DE SEDIMENTO MÁS CERCANAS.	4-44
FIGURA 34: FUNCIONAMIENTO DEL RÍO ACONCAGUA.	4-45
FIGURA 35: FUNCIONAMIENTO DEL ESTERO CAMPICHE.	4-45
FIGURA 36: BATIMETRÍA Y GRILLA EMPLEADA EN MOPLA.	4-52
FIGURA 37: ESPECTRO TMA PARA EL OLAJE.	4-53
FIGURA 38: ESPECTRO DE DIRECCIONES PARA EL OLAJE.	4-53
FIGURA 39: ESPECTRO BIDIMENSIONAL ANTES DE LA ROMPIENTE.	4-54
FIGURA 40: TRANSFORMACIÓN DEL ESPECTRO TMA PARA EL OLAJE.	4-55
FIGURA 41: ESPECTRO BIDIMENSIONAL DESPUÉS DE LA ROMPIENTE.	4-55
FIGURA 42: CORRIENTES GENERADAS POR EL OLAJE.	4-56
FIGURA 43: TRANSPORTE DE SEDIMENTOS GENERADO POR EL OLAJE.	4-58
FIGURA 44: PLAYA EL PAPAGAYO EN EL AÑO 1960.	5-1
FIGURA 45: PLAYA EL PAPAGAYO EN EL AÑO 1979.	5-2
FIGURA 46: RUN-UP EN UNA DE LAS CASAS EXISTENTES EN EL ACANTILADO.	5-3
FIGURA 47: DERRUMBES DE MUROS Y DESLIZAMIENTO DE TERRENO EN VIVIENDAS ALEDAÑAS.	5-3
FIGURA 48: RUN-UP DE LAS OLAS DEL TEMPORAL DE 1989 EN PLAYA EL PAPAGAYO.	5-6
FIGURA 49: SECCIÓN TIPO DE LA ESCOLLERA DE SOLUCIÓN PROPUESTA POR LA DOP.	5-6
FIGURA 50: REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL TEMPORAL DE 1995 EN PLAYA EL PAPAGAYO.	5-7
FIGURA 51: CASA DAÑADA POR MOTIVOS DE LA EROSIÓN DEL FARELLÓN (VISTA CENTRALIZADA).	5-9

FIGURA 52: VISTA GENERAL DE UNA DE LAS ZONAS DAÑADAS EN LA PLAYA.	5-9
FIGURA 53: VISTA PANORÁMICA DE UNA DE LAS ZONAS CON PROTECCIÓN DE LOS TALUDES.	5-10
FIGURA 54: PROTECCIÓN DE FONDO CONSTRUIDA AL PIE DEL TALUD.	5-10
FIGURA 55: COMPARACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LOS AÑOS 1970 Y 1975.	5-14
FIGURA 56: COMPARACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LOS AÑOS 1975 Y 1980.	5-14
FIGURA 57: COMPARACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LOS AÑOS 1980 Y 1994.	5-17
FIGURA 58: COMPARACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA DE LOS AÑOS 1994 Y 2006.	5-17
FIGURA 59: PUNTOS DE CONTROL PARA LA FORMULACIÓN DE LA PLANTA DE EQUILIBRIO.	5-20
FIGURA 60: DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE EROSIONADA.	5-23
FIGURA 61: ELEMENTO REEF BALL.	6-1
FIGURA 62: SECCIÓN TIPO, ALTERNATIVA 1.	6-2
FIGURA 63: CASO DE ESTUDIO EN REPUBLICA DOMINICA, ANTES Y DESPUÉS DE REEF BALL.	6-2
FIGURA 64: SECCIÓN TIPO, ALTERNATIVA 2.	6-3
FIGURA 65: SECCIÓN UTILIZADA EN EL PROYECTO ISLAS AMWAJ.	6-3
FIGURA 66: SECCIÓN EMPLEADA EN PUERTO GRIS.	6-4
FIGURA 67: UBICACIÓN DE INSTALACIÓN DEL DIQUE ARRECIFE EN PUERTO GRIS.	6-4
FIGURA 68: SECCIÓN TIPO, ALTERNATIVA 3.	6-5
FIGURA 69: PLAYA DE PIEDRAS EN EL SUR DE CHILE (X REGIÓN).	6-5
FIGURA 70: ILUSTRACIÓN DE LA METODOLOGÍA 3.	6-15
FIGURA 71: ZONAS DE UN PERFIL DE PLAYA.	6-17
FIGURA 72: ESQUEMA DE CÁLCULO DE TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE $H_{30\ 137}$	6-19
FIGURA 73: TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL RECOMENDADA PARA DIQUES SUMERGIDOS.	6-26
FIGURA 74: SECCIÓN DE RESPUESTA DEL DIQUE ARRECIFE.	6-29
FIGURA 75: SECCIÓN TIPO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA.	6-33
FIGURA 76: PLAYAS UTILIZADAS PARA COMPARAR.	6-37
FIGURA 77: FORMACIÓN DE EQUILIBRIO PARA LA NUEVA PLAYA EL PAPAGAYO.	6-41
FIGURA 78: NUEVA PLAYA EL PAPAGAYO, PLANTA DE EQUILIBRIO ESTIMADA PARA LA PLAYA DE ARENA.	6-42
FIGURA 79: NUEVA PLAYA EL PAPAGAYO, EQUILIBRIO ESTIMADO PARA LA PLAYA DE PIEDRAS.	6-44
FIGURA 80: PERFIL DE RESPUESTA DE UNA PLAYA DE PIEDRAS ANTE 500 OLAS.	6-48
FIGURA 81: EMPLAZAMIENTOS DE PUNTOS DE MUESTREO.	8-5

LISTA DE PLANOS

- LÁMINA 1: BATIMETRÍA ACTUAL DE PLAYA EL PAPAGAYO.
LÁMINA 2: DISEÑO EN PLANTA DE LA NUEVA PLAYA DE ARENA EL PAPAGAYO.
LÁMINA 3: DETALLE DE LOS ELEMENTOS DE PROTECCIÓN.
LÁMINA 4: DISEÑO EN PLANTA DE LA NUEVA PLAYA DE PIEDRAS EL PAPAGAYO.

REFERENCIAS

- Ref. 1:** Armono, H.D and Hall, K. R. "*Wave Transmission on Sumerged Breakwaters Made of Hollow Hemispherical Shape Artificial Reefs*". A department of Ocean Engineering, Intitute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya Indonesia, 2003.
- Ref. 2:** Battjes, Jurjen. "*Wave Height Distributions on Shallow Foreshores*". Department of Civil Engineering, Delft University of Technhology, Netherlands, 2000.
- Ref. 3:** Bodge, Kevin R. "*Design Aspects of Groins and Jetties*". World Scientific Publishing Co., International Conf. on Coastal Engineering, 2006.
- Ref. 4:** Bodge, Kevin R. "*Groins, Headlands, and Cutting an Island in two in the Maldives*". World Scientific Publishing Co., International Conf. on Coastal Engineering, 2006.
- Ref. 5:** Dean, Robert G. "*Coastal Processes: with Engineering Applications*". Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2002.
- Ref. 6:** Dean, Robert G. "*Beach Nourishment: Theory and Practice*". World Scientific, New Jersey, 2002.
- Ref. 7:** DELOS. "*Environmental Design of Low Crested Defence Structures*".Italia, 2004.
- Ref. 8:** Dirección de Obras Portuarias. "*Dstrucción del Borde Costero Playa El Papagayo*". Departamento de Estudios, Santiago, Chile. 1995.
- Ref. 9:** Goda, Yoshimi. "*Random Seas and Design of Maritime Structures*". World Scientific, University of Tokyo. Japón, 2000.
- Ref. 10:** Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. "*Documentos de Referencia*", Volumen I y II. Universidad de Cantabria, España, 2000.
- Ref. 11:** Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. "*Documento Temático Regeneración de Playas*". Universidad de Cantabria, España, 1998.
- Ref. 12:** Harris, Lee. "*Stability Analysis of Reef Ball Artificial Reef Units*". Florida Institute of Technology, Division of Marine and Environmental Systems, 1996.
- Ref. 13:** Harris, Lee. "*Submerged Reef Structures for Habitat Enhancement and Shoreline Erosion Abatement*". U.S. Army Corps Engineer, Coastal Engineering Technical Note, 2001.

- Ref. 14:** Harris, Lee. *"Artificial Reef for Ecosystem Restoration and Coastal Erosion Protection with Aquaculture and Recreational Amenities"*. Florida Institute of Technology, Division of Marine and Environmental Systems, 2006.
- Ref. 15:** Harry, Friebel. *"A New Wave Transmission Coefficient Model for Submerged Breakwaters"*. U.S. Army Corps Engineer, Coastal Engineering Technical Note, 2003.
- Ref. 16:** Kamphuis, J. William. *"Introduction to Coastal Engineering and Management"*. World Scientific, Queen's University. Canada, 2000.
- Ref. 17:** Kraus, Nicholas C. *"Shoreline Response to Breakwaters with Time-Dependent Wave Transmission"*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2003.
- Ref. 18:** Kraus, Nicholas C. *"Wave Transmission at Detached Breakwaters for Shoreline Response Modeling"*. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, 2002.
- Ref. 19:** Medina Santamaría, Raúl. *"Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de «Equilibrio»"*. Universidad de Cantabria, España, 2001.
- Ref. 20:** Medina Villaverde, José María. *"Hidrodinámica del Perfil de Playa"*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España, 1998.
- Ref. 21:** MOPU. *"ROM. 02-90. Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias"*. España, 1990.
- Ref. 22:** Nicolau del Roure Olivares, Francisco Javier. *"Evaluación de Metodologías de Transferencia de Oleaje desde Aguas Profundas hacia Aguas Someras"*. Santiago, Universidad de Chile, 2004.
- Ref. 23:** OCDI. *"Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities"*. Japón, 2002.
- Ref. 24:** Pilarczyk, Krystian W. *"Design of low-crested (sumerged) Structures – an Overview"*. Delft Hydraulics, Netherlands, 2003.
- Ref. 25:** Sierra J.P. y Lo Presti A. *"Estudio Comparativo de Criterios de Rotura del Oleaje Regular"*. Universidad Politécnica de Catalunya, España. 1997.

- Ref. 26:** Sievers, Hellmuth. *"Programa de Investigación, Vigilancia y Control de la Contaminación Marina por Hidrocarburos de Petróleo en el Pacífico Sudeste y sus Efectos en las Comunidades y Ecosistemas Marinos"*. Universidad de Valparaíso, Chile. 1986.
- Ref. 27:** Silvester R. and Hsu J. *"Coastal Stabilization"*, World Scientific, The University of Western. Australia, 1999
- Ref. 28:** Smith Jane and Sherlock Ann. *"STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 3.0"*. U.S Army Corps of Enginners, 2001.
- Ref. 29:** U. S. Army Corps of Engineers. *"Coastal Engineering Manual"*. Volumen II, chapter 1. Volumen III, chapter 1, 2 and 3, 2003
- Ref. 30:** U. S. Army Corps of Engineers. *"Shore Protection Manual"*. Volumen I and II, 1984
- Ref. 31:** USR Corporation. *"Section 227 National Shoreline Erosion Control. Development and Demonstration Program."*. Miami Beach, Florida. 2003.
- Ref. 32:** Valdes, Jose Maria. *"Diques Arrecife: Análisis de los Métodos de Diseño"*. CEDEX, España. 1995.
- Ref. 33:** van der Meer, Jentsje W. *"Rock Slopes and Gravel Beaches under Waves Attack"*. Delft Hydraulics Communication, Netherlands, 1988.
- Ref. 34:** van Rijn, Leo C. *"Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas"*. Aqua Publications, Emmeloord NL, 2005.
- Ref. 35:** van Rijn, Leo C. *"Principles of Coastal Morphology"*. Aqua Publications, Amsterdam, 1998.
- Ref. 36** Vergara, Hernán. *"Manual de Laboratorio para Sedimentología"*. Instituto de Oceanología, Viña del Mar, 1991.

RESUMEN

El presente documento consiste en el proyecto de título llamado "Estudio de Erosión Costera y Regeneración de Espacios Litorales. Una Aplicación en Playa El Papagayo, Quintero.". El cual ha sido abordado en tres puntos principales. En primera instancia se ha caracterizado el medio determinando las condiciones naturales presentes en el sector de estudio, para posteriormente analizar las causas que determinan el patrón de erosión de la playa y proponer alternativas de solución.

En el estudio de erosión se determinó que la línea de costa ha retrocedido a una tasa de 2 m/año, después de la extracción de las algas, y que mediante la construcción del rompeolas al pie del talud, logró controlarse en ese sector el proceso erosivo, pero se perdió una gran extensión de playa.

Finalmente como alternativa para la regeneración de espacios litorales se consideró una playa de arena contenida por la intervención de un dique arrecife dinámicamente estable y por otro lado una playa de piedras que se mantiene estable de acuerdo al gran tamaño de la grava propuesta para la regeneración.

1 INTRODUCCIÓN

En el año 1536 Don Alonso de Quintero al mando de la embarcación "Santiago" arriba a costas chilenas desarrollando una carta de navegación del lugar de atraque al cual denomina con el nombre de Bahía de Quintero.

En el año 1865 mediante decreto supremo, el Presidente José Joaquín Pérez declara conjuntamente a Quintero como comuna y Puerto Mayor.

A lo largo de los años, esta comuna ha recibido innumerables visitas de personajes ilustres (Charles Darwin, Luis Cousiño, Isidora Goyenechea, Lord Cochrane, etc.). Así como también ha estado presente en variados hitos históricos de nuestro país (tales como el primer vuelo hacia la isla de pascua, protagonizado por el Manutara y el primer vuelo oficial de la Aviación Naval creada por el Presidente Don Arturo Alessandri Palma, etc.).

Quintero es una comuna ubicada aproximadamente a cincuenta kilómetros al norte de Valparaíso. En la actualidad cuenta con una población alrededor de diecisiete mil habitantes.

En la actualidad es uno de los balnearios más concurridos de la Quinta Región debido a la calidad de sus playas y además su bahía es un polo de desarrollo energético de gran trascendencia nacional.

En la Ilustración 1 se muestra la ubicación de la comuna de Quintero.



Ilustración 1: Ubicación de Quintero.
(Fuente: Sernatur)

La comuna de Quintero tiene una configuración geográfica del tipo Bahía, la cual está limitada por la Península de los Molles por el sur y Punta Ventanillas, por el norte. En el costado poniente de la península de los Molles se encuentran numerosas playas, donde una de ellas es la llamada "Playa El Papagayo", la que se ha visto afectada por un proceso erosivo. La ubicación exacta de la playa se muestra en la Ilustración 2.

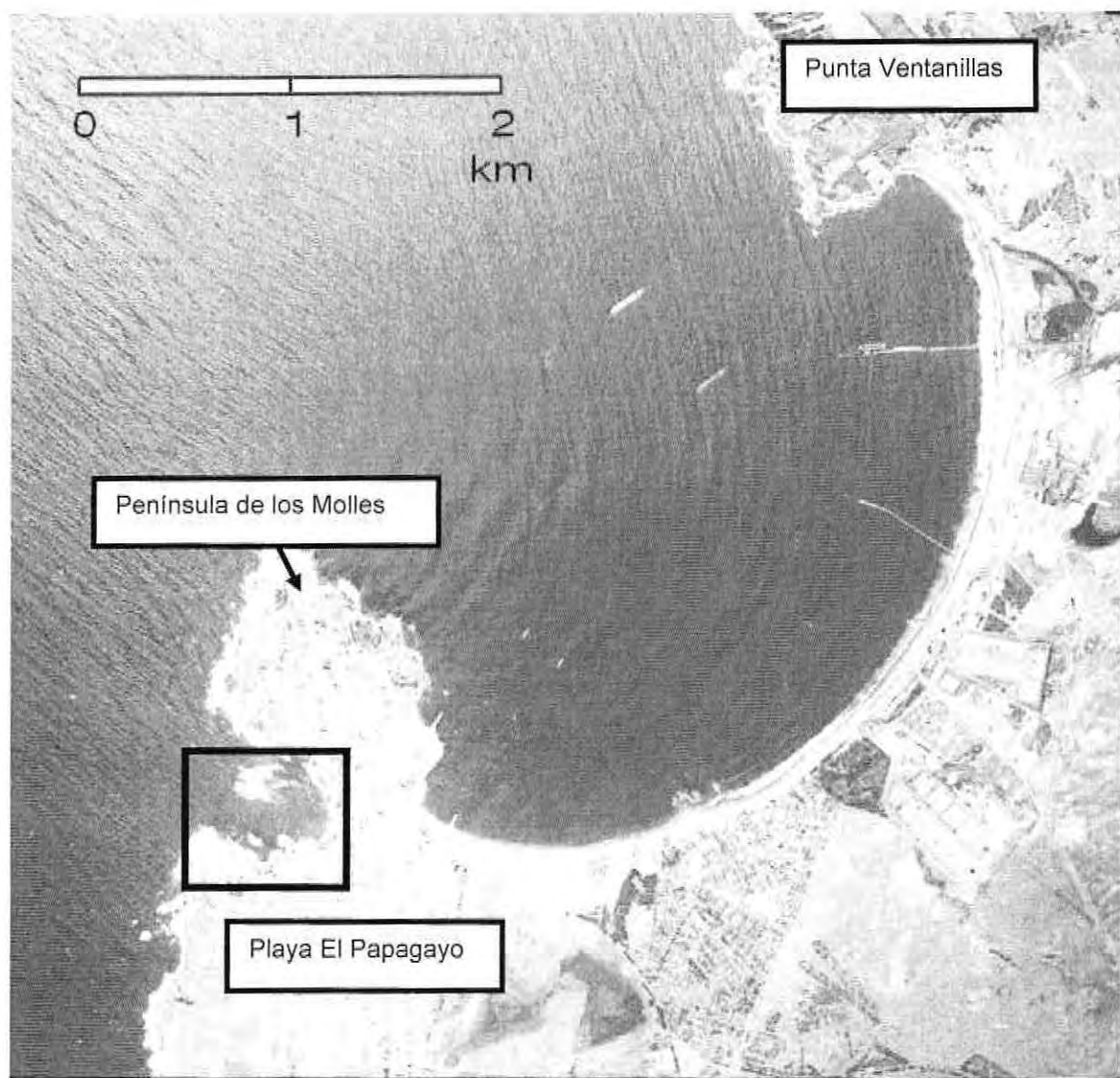


Ilustración 2: Ubicación de playa El Papagayo.

(Fuente: Archivo Personal).

Este proceso erosivo puso en riesgo la seguridad de las casas y construcciones colindantes con la playa, provocando finalmente la implementación de una protección de rocas (escollera) sobre una gran extensión del terreno de playa disponible.

El inicio y efectos de la erosión costera son materia del presente proyecto de título, así como también la formulación de alternativas de solución que sean compatibles con el desarrollo sustentable de la Playa El Papagayo y en pos de una mejora del entorno, tanto para las características visuales, como ambientales y la seguridad de las viviendas colindantes con el sector afectado.

2 OBJETIVOS

2.1 MOTIVACIÓN

La Ingeniería de Costas es una de las áreas de la Ingeniería Marítima que mezcla la mayor cantidad de temáticas, que van desde el análisis y procesamiento de datos al diseño de obras de protección. Lo que genera que el estudio del comportamiento y de erosión de una playa, sea una labor enriquecedora y de una profunda investigación.

Actualmente la Dirección de Obras Portuarias, el Instituto Nacional de Hidráulica y algunas empresas privadas, han llevado a cabo estudios para el desarrollo de playas artificiales, siendo alguna de estas construidas en el norte del país. Todos estos proyectos han sido testeados en modelos numéricos y físicos para evaluar su evolución morfodinámica.

El presente proyecto de título recoge conocimientos de la Ingeniería de Costas, que con el apoyo de estudios realizados especialmente para esta evaluación, permiten concretar el estudio de erosión y proposición de dos opciones de regeneración de la Playa El Papagayo.

2.2 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un estudio que permita la caracterización del funcionamiento de la Playa El Papagayo, y proponer una alternativa de regeneración de espacios litorales, entrelazando los conceptos fundamentales de la ciencia con herramientas tecnológicas disponibles.

2.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el clima de oleaje.
- Determinar las causas del proceso erosivo.
- Cuantificar el volumen erosionado de la playa.
- Implementar de un modelo numérico del funcionamiento de la playa y sensibilizarlo mediante el uso del software SMC.
- Generar un proyecto de regeneración de la playa y trazar las pautas generales para la ejecución.
- Aportar con una propuesta metodológica para los estudios de erosión costera.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 OLEAJE

3.1.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE ONDAS

Físicamente una onda se define, como la propagación de una perturbación en un medio que en su movimiento sólo existe un desplazamiento de energía, mientras que la masa oscila y no se desplaza.

Esta definición se puede aplicar a la definición de oleaje, siempre y cuando se le realicen ajustes en su enunciado, ya que las olas en su propagación desplazan energía y masa, como efecto menor.

En general se pueden clasificar de acuerdo a sus periodos o longitudes. La Figura 1 muestra en un esquema la clasificación de las ondas en el mar de acuerdo al periodo y a la fuerza que la genera.

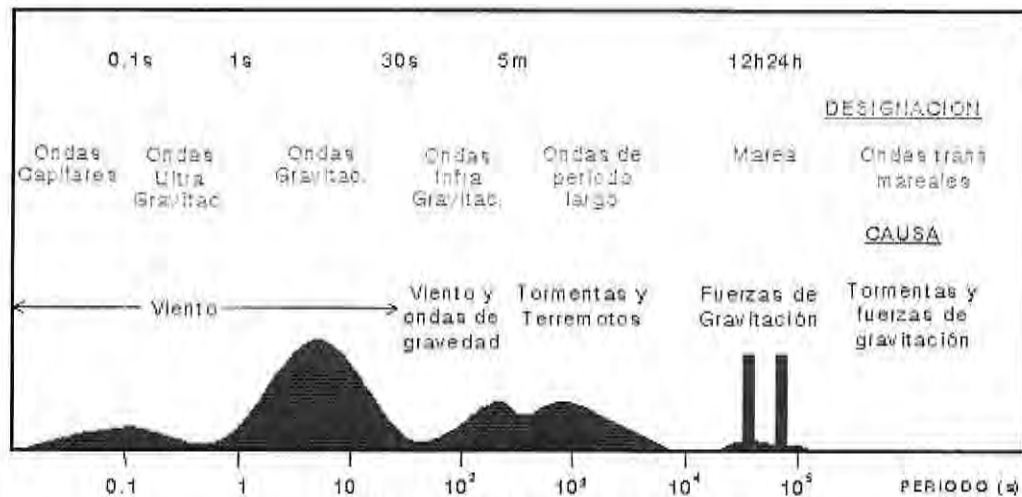


Figura 1: Clasificación de las olas.
(Fuente: Ref. 10)

En la Tabla 1 se muestra de manera resumida las fuerzas generadoras, fuerzas restauradoras, periodos y longitudes, para distintos tipos de olas.

Tabla 1: Resumen fuerzas generadoras y restauradoras del oleaje.
(Fuente: Ref. 10)

Movimiento	Período y Longitud	Fuerzas Generadoras	Fuerzas Restauradoras	Ejemplo
Ondas Capilares	0.1 segundos 10^{-2} metros	Viento	Tensión superficial; gravedad	Rizado de viento
Ondas Ultragravitatorias	0.1 – 1 segundos 100 metros	Viento	Gravedad	Ondas de viento en una charca
Ondas Gravitatorias	1 – 30 segundos $1 - 10^3$ metros	Viento y oleaje de viento	Gravedad; fricción	Sea y Swell
Ondas Largas	5 minutos $10^5 - 10^6$ metros	Tormentas y Terremotos	Gravedad; coriolis; fricción	Tsunamis
Ondas de Marea Astronómica	12.42 – 24.84 horas 10^7 metros	Rotación de la tierra; atracción Luna, Sol	Gravedad; coriolis; fricción	Marea Astronómica
Ondas Transmareales	24 horas 10^7 metros	Orbita solar; gravitación	Gravedad; coriolis; fricción	Marea Meteorológica

3.1.2 PROPIEDADES DE LAS ONDAS

Para definir las propiedades de una onda, se asume que en un cierto nivel del mar se encuentra sin movimiento, recibiendo el nombre de nivel de reposo, es decir, aquel nivel del fluido donde no hay presencia de olas, y es común encontrarlo en la literatura denominado por la sigla SWL (Still Water Level).

Si se traza el nivel del reposo, se obtiene que la trayectoria seguida por las partículas propagadas (en la superficie) de la onda cumplen las condiciones de la Figura 2, que resume las características generales de una onda, las cuales son la longitud (L), periodo (T), amplitud de la cresta (A_c) y amplitud del seno (A_s).

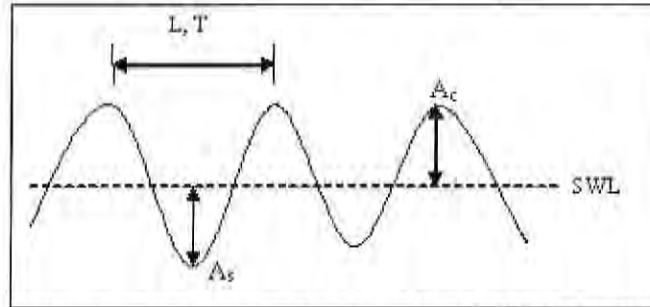


Figura 2: Representación simplificada de una onda.
(Fuente: Elaboración Propia).

Se define longitud de onda (L) como la distancia horizontal entre dos puntos sucesivos en fase y el tiempo que demora una partícula en recorrer una longitud se denomina periodo de la onda (T). La amplitud de cresta (A_c) y de seno (A_s), se definen como la distancia vertical entre el nivel de reposo y la cresta y el seno, respectivamente. Si se asume que ambas amplitudes son iguales y que la ola es simétrica respecto del SWL, se está en presencia de un oleaje regular. La altura de la ola (H) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$H = A_c + A_s \quad \text{Ecuación 1}$$

Usualmente para simplificar el análisis del movimiento oscilatorio (oleaje regular), se asume que la onda tiene una amplitud única, por lo tanto $A_c = A_s = A$. De este modo puede calcularse la altura como el doble de la amplitud, es decir, $H = 2A$.

Cuando el oleaje interactúa con el fondo, el nivel del mar sufre un peraltamiento y se hace necesario realizar otro tipo de análisis para determinar las propiedades, ya que se suman algunas variables que son de relevancia determinarlas. Si se traza un nivel medio de referencia usualmente denominado MWL (Mean Water Level) (Figura 3).

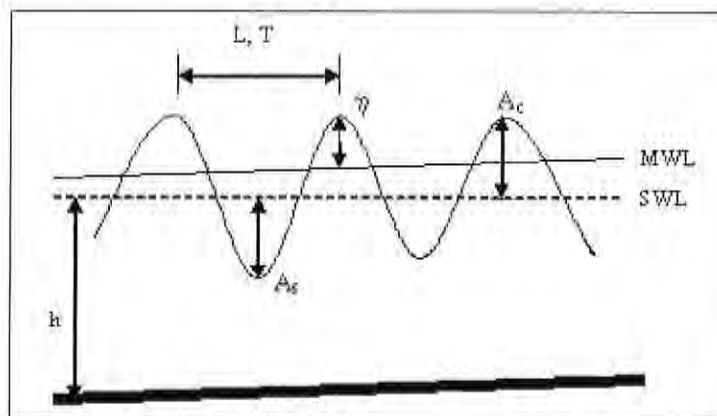


Figura 3: Características adicionales de una onda.
(Fuente: Elaboración Propia).

Se define la distancia h entre el SWL y el fondo como la profundidad y η es la desnivelación instantánea.

Las ondas tienen otros parámetros presentes en las formulaciones matemáticas del movimiento oscilatorio como el número de onda (k), el cual se obtiene de la siguiente expresión:

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \text{Ecuación 2}$$

Además, se define la frecuencia angular (ω) como:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{Ecuación 3}$$

La frecuencia absoluta (f) se obtiene de la siguiente expresión:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Ecuación 4}$$

La celeridad o velocidad de fase de la onda se define como:

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} \quad \text{Ecuación 5}$$

Las ondas generalmente son progresivas, es decir, se propagan desde la zona de generación hacia un punto con una dirección, longitud y amplitud. Sin embargo en ocasiones éstas se propagan en sentido opuesto y se superponen generando ondas estacionarias o cuasi estacionarias, es decir, no se propagan y sólo se manifiestan como un movimiento ascendente y descendente de las partículas cuyo desplazamiento de la superficie libre o desnivelación instantánea está dado por la ecuación 7, mientras que para ondas progresivas η se determina con la ecuación 6.

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cdot (1 + K_R) \cos(kx) \cdot \cos(\omega t) + \frac{H}{2} \cdot (1 - K_R) \operatorname{sen}(kx) \cdot \operatorname{sen}(\omega t) \quad \text{Ecuación 7}$$

3.1.3 ECUACIONES GENERALES DEL MOVIMIENTO

Estas ecuaciones tienen el carácter de diferenciales (para el potencial o el flujo) y por lo tanto para ser resueltas necesitan de valores en la frontera, comúnmente conocidas como condiciones de borde.

La adopción de las condiciones de borde son las que finalmente condicionan el campo cinemática y dinámico asociado a las distintas teorías de oleaje. La Tabla 2 muestra en resumen las condiciones de borde consideradas para las teorías de oleaje clásicamente aceptadas:

Tabla 2: Resumen de condiciones de borde para las diferentes teorías de oleaje
(Fuente: Ref. 29).

Table II-1-2
Boundary Value Problem of Water Wave Theories (Dean 1968)

Theory	Exactly Satisfies			
	DE	BBC	KFSBC	DFSBC
Linear wave theory	X	X	-	-
Third-order Stokes	X	X	-	-
Fifth-order Stokes	X	X	-	-
First-order cnoidal	-	X	-	-
Second-order cnoidal	-	X	-	-
Stream function theory numerical wave theory	X	X	X	-

DE = Differential equation.
BBC = Bottom boundary condition.
KFSBC = Kinematic free surface boundary condition.
DFSBC = Dynamic free surface boundary condition.
X = Exactly satisfies.

Las ecuaciones que usualmente se consideran para la solución de los problemas de ondas son las de conservación de la masa, de la cantidad de movimiento y de la energía. Encontrar una solución analítica para estas ecuaciones de gobierno es un proceso complejo y generalmente se deben aplicar modelos numéricos para encontrar una buena solución. Una manera de simplificar dichas ecuaciones es plantear algunos supuestos, los cuales se detallan a continuación:

- El fluido es un medio continuo y homogéneo.
- El fluido es incompresible.
- El periodo de las ondas es despreciable respecto del periodo de rotación de la tierra.
- La única fuerza externa que actúa es la gravedad.

La implicancia de que los periodos de las ondas sean despreciables respecto del periodo de rotación de la tierra, avala la eliminación del efecto de coriolis de las ecuaciones de gobierno del fenómeno. De esta manera si se considera un vector de velocidades de acuerdo a la ecuación 8 y definiendo además p como la presión y ρ como la densidad, se pueden escribir las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento (Ecuaciones de Euler) de acuerdo a las ecuaciones 9, 10 y 11.

$$\vec{u} = u(\hat{i}) + v(\hat{j}) + w(\hat{k}) \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - g \quad \text{Ecuación 11}$$

Formando un sistema con las ecuaciones 9, 10 y 11 se puede apreciar que se tienen cuatro incógnitas (u , v , w y p) y tres ecuaciones, por lo tanto se hace necesario la incorporación otra condición. Esta condición es la de conservación de la masa para un fluido es incompresible (ecuación 12).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación 12}$$

La solución del sistema de ecuaciones resulta complicado, por lo tanto es usual definir funciones escalares para efectuar dicha solución. Una función escalar matemáticamente aceptada es la del potencial de velocidades, definida como Φ tal que se satisfaga la siguiente expresión:

$$\vec{u} = -\nabla\Phi \quad \text{Ecuación 13}$$

La ecuación 13 es válida para flujo irrotacional. Combinando la ecuación 12 y 13, se puede obtener la siguiente expresión:

$$\nabla^2\Phi = \frac{\partial^2\Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Phi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{Ecuación 14}$$

En la literatura se conoce a la ecuación 14 como la expresión de Laplace, válida para todo el dominio del fluido. Emplear esta ecuación es una simplificación ya que como pueden expresarse las velocidades en función del potencial, los problemas se ven reducidos a dos incógnitas, siendo éstas Φ y p . Ahora se tiene un problema de dos variables y sólo una ecuación, por lo que se debe obtener una ecuación adicional para este problema. Para lograr esto se integran las ecuaciones de Euler para relacionar el potencial con la presión (ecuación 15).

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = C(t) \quad \text{Ecuación 15}$$

La ecuación 15 es conocida como la de Bernoulli para un flujo no estacionario e irrotacional, siendo válida en todo el fluido.

3.1.4 DISCRIMINACIÓN DE LA VALIDEZ DE LAS TEORÍAS DE OLEAJE

Actualmente existen variadas teorías para caracterizar el movimiento de las olas y poder determinar las propiedades con la cuales se propaga, algunas de las más utilizadas son:

- Teoría Lineal del Oleaje (TLO).
- Teoría de Stokes (primer, segundo, tercer y quinto orden)
- Teoría Cnoidal (primer y segundo orden).

Definiendo previamente H , L y h , como la altura de ola, la longitud de onda y la profundidad en la cual se encuentra, definen los siguientes números adimensionales.

$$\varepsilon = \frac{H}{L} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\delta = \frac{H}{h} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\mu = \frac{h}{L} \quad \text{Ecuación 18}$$

El parámetro ε se denomina esbeltez de la onda (peralte), δ es denominado altura relativa de la onda y μ como la profundidad relativa. Con ε se obtiene una relación para determinar la pendiente de la ola, mientras que el valor μ permite determinar la condición de profundidad relativa de propagación, definida para los siguientes rangos.

$$\begin{aligned} \text{Si } \mu > \frac{1}{2} & \text{ se está en aguas profundas} \\ \text{Si } \frac{1}{20} < \mu < \frac{1}{2} & \text{ se está en aguas intermedias} \\ \text{Si } \mu < \frac{1}{20} & \text{ se está en aguas someras} \end{aligned}$$

En condiciones de aguas profundas, las ondas no se ven afectadas por las condiciones de fondo en su propagación y a medida que la profundidad relativa tiende hacia aguas someras, la onda comienza a deformarse. *Le Méhauté (1976)* (Ref. 29), propone que mediante los parámetros adimensionales de las ecuaciones 19 y 20 y la Figura 4, se puede determinar la teoría de oleaje apropiada para cada caso de estudio.

$$\frac{H}{gT^2} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\frac{h}{gT^2} \quad \text{Ecuación 20}$$

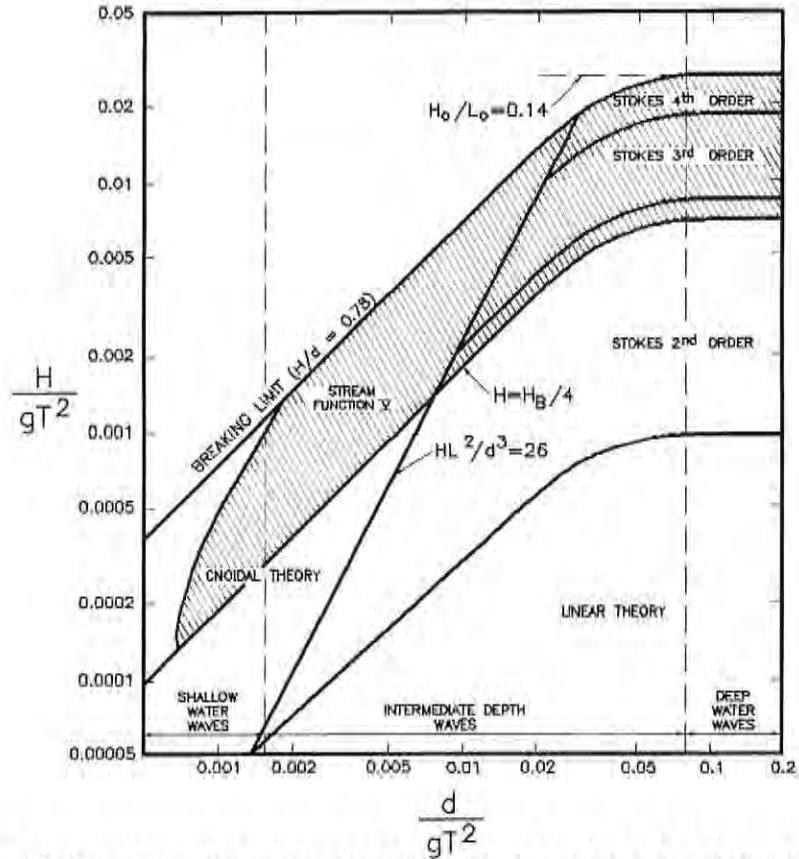


Figura 4: Gráfico para discriminar la validez de las teorías (Le Méhauté 1976).
(Fuente: Ref. 29).

3.2 TENSORES DE RADIACIÓN

Uno de los fenómenos predominantes en el transporte longitudinal de sedimentos es el flujo de momentum, caracterizado a través del tensor de radiación. Este permite explicar fenómenos tales como el Set – Up, Set – Down y el transporte longitudinal de sedimentos.

La derivación se basa en que existe una onda progresiva regida por la teoría lineal del olaje. Así se puede expresar el flujo medio de momento integrado en la vertical como:

$$\int_h^0 (\rho u) u dz = \int_h^0 \rho u^2 dz + \int_h^0 \rho u^2 dz \quad \text{Ecuación 21}$$

Debido al supuesto de linealidad, la segunda integral se desprecia, además con el supuesto de onda progresiva se sabe que:

$$u^2 = \frac{gA^2 k}{\sinh(2kh)} [1 + \cosh(2k(h+z))] \quad \text{Ecuación 22}$$

De este modo, se puede expresar la primera integral de la ecuación 21 como:

$$\int_{-h}^0 \overline{\rho u^2} dz = En = MC_g \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde E es la energía media de la ola, M es el flujo medio de masa y C_g es la calidad de grupo.

Con la expresión anterior y las fuerzas debido a presiones de la columna del agua, se plantea que para obtener una de las componentes del tensor de radiación basta resolver la siguiente expresión:

$$S_{xx} = MC_g + \int_{-h}^0 p(z) dz - \frac{1}{2} \rho g (h + \eta)^2 \quad \text{Ecuación 24}$$

La ecuación 24 representa el exceso de flujo de momento respecto a la carga hidrostática y no es más que una fuerza por unidad de superficie que representa dicho exceso por la presencia de las ondas. De esta forma se ha derivado una expresión para el tensor de radiación en una de las direcciones. De manera análoga se pueden expresar los tensores para las direcciones mostradas en la Figura 5, como:

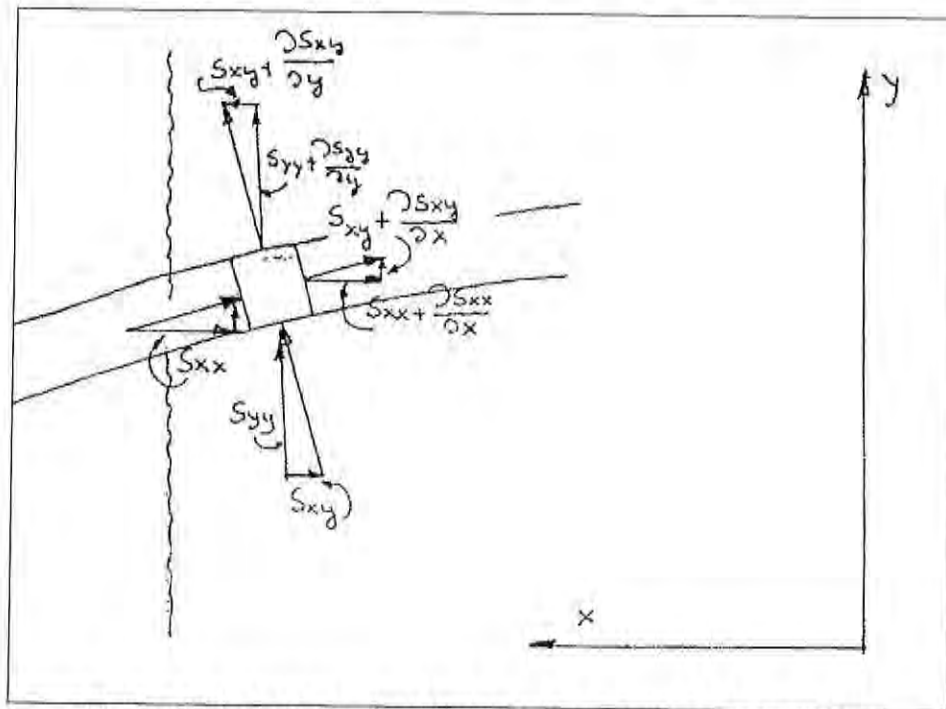


Figura 5: Direcciones de cálculo de los tensores de radiación.

(Fuente: Ref. 10).

$$S_{yy} = \int_{-h}^0 p(z) dz - \frac{1}{2} \rho g (h + \eta)^2 \quad \text{Ecuación 25}$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \int_{-h}^0 \overline{p v w} dz \quad \text{Ecuación 26}$$

En la teoría lineal del oleaje, suelen plantearse de manera general los tensores de radiación de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$S_{xx} = \rho g \iint E(f, \theta) \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) (\cos^2 \theta + 1) - \frac{1}{2} \right] df d\theta \quad \text{Ecuación 27}$$

$$S_{xy} = \rho g \iint \frac{E(f, \theta)}{2} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \sin 2\theta \right] df d\theta \quad \text{Ecuación 28}$$

$$S_{yy} = \rho g \iint E(f, \theta) \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) (\sin^2 \theta + 1) - \frac{1}{2} \right] df d\theta \quad \text{Ecuación 29}$$

Cuando los tensores de radiación no mantienen un valor constante a lo largo de todo su eje de acción, sobre todo en la zona de rompiente, se calcula el gradiente que tiene como forma general de cálculo las siguientes expresiones:

$$\tau_x = -\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\tau_y = -\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \quad \text{Ecuación 31}$$

El estudio de los tensores de radiación resulta una pieza clave en temas relacionados con la ingeniería de costas, ya que con ellos se determina el transporte de sedimentos, corrientes de retorno, etc.

3.3 TRANSFERENCIA ESPECTRAL DEL OLAJE

3.3.1 TRANSFORMACIÓN DEL OLAJE EN LA PROPAGACIÓN

Cuando el oleaje comienza a acercarse a las proximidades de la costa, experimenta una serie de fenómenos que hacen cambiar sus características mecánicas. Siendo los más comunes la refracción, difracción, reflexión, shoaling y rompimiento, entre otros. Estos fenómenos se describen a continuación.

(a) *Refracción*

Se define como la deflexión en la dirección la onda debido a cambios en la velocidad de propagación, inducidos por cambios en la profundidad o interacción con corrientes.

Como las olas del frente de un tren de ondas se propagan en aguas menos profundas que las olas de la zona posterior del mismo tren, hay cambios de celeridad encontrándose una mayor magnitud de ésta, ante una mayor profundidad en la zona en que se está propagando. Pero este cambio de no sólo puede deberse a cambios en el fondo de la zona de propagación, si no que además por la interacción de la ola con alguna corriente. Existen diversas formas de estimar la incidencia de la refracción sobre un tren de ondas, siendo una de las soluciones comúnmente desarrolladas aquella donde existe una batimetría de característica recta y paralela a la costa (Figura 6), la cual se explica a continuación.

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

$$H^2 \cdot C_g \cdot b = cte \quad \text{Ecuación 32}$$

De este modo si se considera la propagación del oleaje entre dos puntos (ver Figura 6) y basándose en la conservación de la ola, es decir, el periodo de la onda permanece constante, se obtiene que:

$$\frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1 \tanh\left(\frac{2\pi d_1}{L_1}\right) b_1}{n_2 \tanh\left(\frac{2\pi d_2}{L_2}\right) b_2}} \quad \text{Ecuación 33}$$

La proporción b_1/b_2 corresponde a todos los efectos en planta que transforman al oleaje y su raíz se define como coeficiente de refracción (ecuación 34), mientras que los términos restantes son los efectos en sección.

$$K_r = \sqrt{\frac{b_1}{b_2}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Mediante la ley de Snell se puede relacionar el ángulo de incidencia del oleaje con el ancho entre ortogonales, obteniendo de esta manera que:

$$\frac{\sin \theta}{b} = cte \quad \text{Ecuación 35}$$

Aplicando la ecuación 35, se obtiene que la proporción b_1/b_2 se puede expresar en términos de la proporción de los senos del ángulo de incidencia ($\sin \theta_1/\sin \theta_2$). Finalmente se puede expresar la altura de oleaje en un punto cualquiera que sólo ha sido afectada por refracción, en función de la altura costa afuera, como:

$$H = H_0 \cdot K_r$$

Ecuación 36

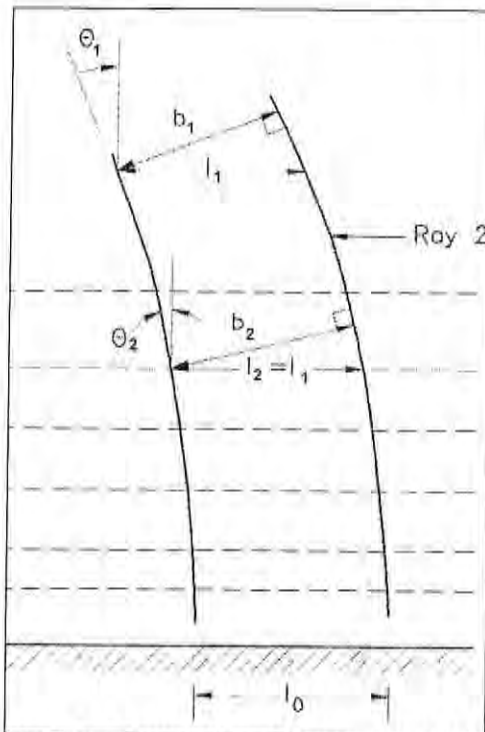


Figura 6: Esquema de una ola refractada.
(Fuente: Ref. 29).

(b) Difracción

Se define difracción como el proceso de transferencia de energía de manera lateral entre el tren de ondas, es decir, en la dirección perpendicular al sentido de la propagación del oleaje. Generalmente este fenómeno ocurre cuando el tren de ondas en su propagación se encuentra con un obstáculo, que eventualmente podría ser alguna estructura costera como diques o simplemente una afloración de formaciones rocosas.

Las ecuaciones que rigen este fenómeno se pueden expresar en función del potencial y se resumen a continuación (Ref. 10):

$$\nabla^2 \Phi + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad -h(x) \leq z \leq 0$$

Ecuación 37

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad z = 0$$

Ecuación 38

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad z = 0$$

Ecuación 39

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = 0 \text{ en el obstáculo}$$

Ecuación 40

Con la solución de estas ecuaciones se llega a la obtención de un coeficiente de difracción denotado comúnmente como K_d , pero la solución de estas ecuaciones se torna un tanto compleja, por lo tanto es usual emplear un modelo numérico para la obtención del coeficiente.

Uno de los casos frecuentemente empleados es la determinación del coeficiente de difracción para un dique semi infinito e incidencia normal, donde se puede demostrar que dicho coeficiente adopta un valor dado por la ecuación 42. Donde η es la desnivelación máxima difractada y A es la amplitud de onda incidente.

$$K_d = \frac{H_d}{H_i}$$

Ecuación 41

Además de una incidencia normal en un dique semi infinito, existe el caso de una incidencia oblicua, para lo cual es común utilizar diagramas de difracción (ver Figura 7 propuesta por *Wiegel* 1962 y reproducida en la Ref. 30).

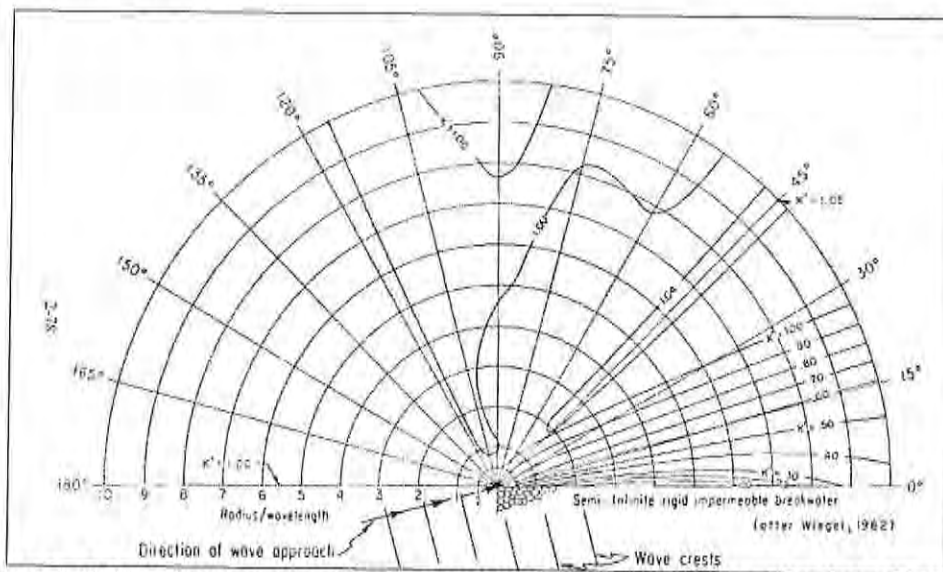


Figura 7: Difracción para un dique semi infinito con incidencia oblicua del oleaje.
(Fuente: Ref. 30).

La difracción afecta la altura de ola de acuerdo a lo descrito en la ecuación 43, donde H_i es la altura de ola incidente, H_d es la altura de ola difractada y K_d el coeficiente de difracción:

$$H_d = H_i \cdot K_d$$

Ecuación 42

(c) Reflexión

La reflexión es el cambio abrupto de dirección en la propagación del oleaje, provocando que la onda cambie de sentido. Esta se genera cuando un tren de onda interactúa con estructuras artificiales o naturales y en ocasiones se produce también por condiciones propias del fondo (batimetría) y morfológicas especiales de playas. Existen casos donde la reflexión en playas genera ondas atrapadas en la costa provocando cambios sobre la morfodinámica, logrando incluso alterar los mecanismos naturales de sedimentación y transporte de éstos. Una onda atrapada induce cambios en la dinámica de las corrientes litorales provocando desplazamientos en la zona de rompiente de la playa.

El coeficiente de reflexión (K_R) se define de acuerdo a la ecuación 44, es decir, se estima K_R como la proporción de la altura de la ola reflejada respecto de la altura de la ola incidente.

$$K_R = \frac{H_{reflejada}}{H_{incidente}} \quad \text{Ecuación 43}$$

En ocasiones la reflexión no es total, es decir, que una porción de la ola se refleja y otra sigue propagándose o una parte se absorbe. La ola que sigue propagándose luego de la reflexión es usualmente llamada como ola transmitida y es común encontrarlas cuando la reflexión se genera en diques permeables, es decir, que tienen un cierto grado de porosidad que permite el paso de la perturbación a través de los espacios.

(d) Shoaling (asomeramiento)

Cuando una ola se aproxima a la costa, se observa un aumento en su altura, que además tiene asociado una disminución de la longitud. A esta transformación se le denomina asomeramiento o Shoaling y se debe principalmente a que a medida que el tren de ondas se aproxima a la costa, se produce una variación en la profundidad. Para poder resolver el problema de la transformación del oleaje debido a la acción del Shoaling, se plantean dos supuestos fundamentales:

- El periodo de la onda permanece constante.
- El flujo de energía en la dirección de la propagación permanece constante entre ortogonales.

Para que estos dos supuestos sean válidos, es necesario que la variación de la profundidad sea suave. Por lo tanto si se considera que el movimiento es unidireccional y no hay presencia significativa de corriente, la conservación del flujo de energía se plantea a partir de la ecuación 45:

$$\frac{d}{dx} (EC_g) = 0 \quad \text{Ecuación 44}$$

De esta manera, se puede demostrar que debido a la conservación de la energía se mantiene constante el producto del cuadrado de la amplitud con la velocidad de grupo del tren de ondas. En términos matemáticos se tiene que:

$$H^2 C_g = cte \quad \text{Ecuación 45}$$

Debido a la ecuación 46, es que se puede ligar la amplitud de la onda a lo largo de todo su recorrido, ya que la velocidad de grupo depende sólo de la profundidad y el periodo.

Si se considera que una onda se propaga desde una profundidad h_2 con altura de onda H_2 , cuando llegue a una profundidad h_1 , la altura H_1 será función de:

$$H_1 = H_2 \sqrt{\frac{C_{g2}}{C_{g1}}} \quad \text{Ecuación 46}$$

De esta manera el coeficiente de Shoaling o asomeramiento sería el dado por la ecuación 48:

$$K_s = \frac{H_1}{H_2} \quad \text{Ecuación 47}$$

En la literatura es común encontrar el coeficiente de asomeramiento considerando que la primera condición de propagación es en aguas profundas, por lo tanto se obtiene un coeficiente de Shoaling de manera general expresado por la ecuación 49:

$$K_s = \frac{H_1}{H_0} = \sqrt{\frac{C_{g0}}{C_{g1}}} = \frac{1}{\sqrt{2n \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right)}} \quad \text{Ecuación 48}$$

La acción pura del asomeramiento afecta la altura de ola de acuerdo a lo expresado en la ecuación 50:

$$H_1 = H_0 \cdot K_s \quad \text{Ecuación 49}$$

Donde H_0 es la altura off shore, K_s el coeficiente de asomeramiento y H_1 es la altura de ola en una profundidad dada.

(e) *Rompimiento*

Cuando la onda se acerca a la costa aumenta su altura y reduce la longitud de acuerdo al fenómeno de Shoaling. Ese aumento de la esbeltez tiene un límite, ya que al alcanzar un cierto valor la ola se torna inestable y por lo tanto se genera el rompimiento, es decir, la liberación de la energía acumulada en la masa de agua.

Cuando la ola rompe genera turbulencia y poniendo en suspensión el sedimento y transportándolo.

Una expresión general para el rompimiento de una onda progresiva en un fondo horizontal, regida por la Teoría de Stokes, es la dada por la ecuación 51. A partir de ésta, se puede plantear la altura de ola rompiente en distintas profundidades relativas y de este modo para aguas profundas donde $h_b \gg L_b$ se tendría la ecuación 52, mientras que en aguas someras rige la ecuación 53.

$$\frac{H_b}{L_b} = \frac{1}{7} \tanh\left(2\pi \frac{h_b}{L_b}\right) \quad \text{Ecuación 50}$$

$$H_b = \frac{1}{7} L_b = 0.142 \cdot L_b \quad \text{Ecuación 51}$$

$$H_b = \frac{2\pi}{7} h_b = 0.89 \cdot h_b \quad \text{Ecuación 52}$$

Uno de los primeros criterios de rompimiento fue el planteado por *McCowan (1894)* y establecía que la altura de rompimiento era:

$$H_b = \gamma \cdot h_b \quad \text{Ecuación 53}$$

Donde γ es el coeficiente de rompimiento que toma valores entre 0.7 a 1.3. Esta ecuación relaciona directamente la profundidad de un lugar con la altura de ola que rompería en ese sitio, de manera similar a lo planteado en la ecuación 53.

Se puede diferenciar el tipo de rompiente en función de la determinación de un número adimensional, siendo el número de Iribarren (surf similarity parameter) el más empleado (ecuación 55).

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\frac{H_o}{L_o}} \quad \text{Ecuación 54}$$

Además se puede emplear el número de Iribarren para rotura, el cual se expresa como:

$$I_{rb} = \frac{\tan \beta}{\frac{H_b}{L_u}} \quad \text{Ecuación 55}$$

Para ambos casos β es la pendiente de la playa, H_o , L_o y H_b son la altura, longitud en aguas profundas y la altura rompiente, respectivamente.

De acuerdo al valor adoptado por el número de Iribarren, se tienen cuatro tipos de rompientes, los cuales se detallan a continuación.

- Rompimiento tipo Spilling o Descrestamiento (ver Figura 8)

"Se caracterizan debido a que en la cresta de la ola aparece espuma, burbujas y turbulencia y eventualmente cubren parte del frente de la misma. La rotura del perfil comienza en la cresta, que se descresta formando un pequeño chorro en algunos casos imperceptible que resbala en el frente de la onda." (Ref. 10)

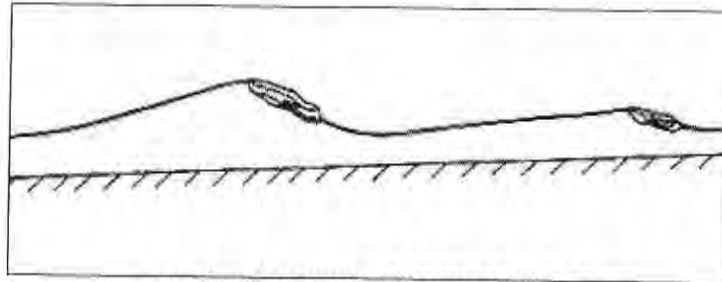


Figura 8: Rompimiento tipo Spilling.
(Fuente: Ref. 10).

- Rompimiento tipo Plunging o Voluta (ver Figura 9).

"La mayor parte del frente de la onda adquiere la posición vertical, formando una voluta, con un chorro en la parte superior que envolviendo una masa de aire se precipita contra la base de la onda originando un salpicón y roción de agua." (Ref. 10).

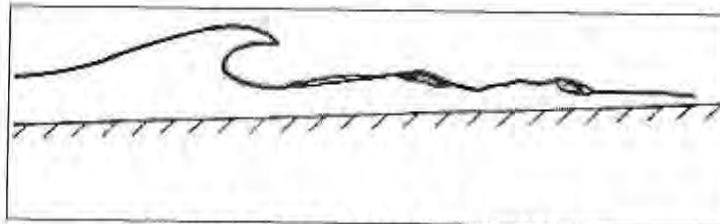


Figura 9: Rompimiento tipo Plunging.
(Fuente: Ref. 10).

- Rompimiento tipo Collapsing o Colapso (ver Figura 10).

"La parte inferior del frente de la onda se peralta y voltea comportándose como una rotura truncada, ya que el punto del frente desde la onda voltea o se desmorona, está delante y por debajo de la cresta de la ola." (Ref. 10).

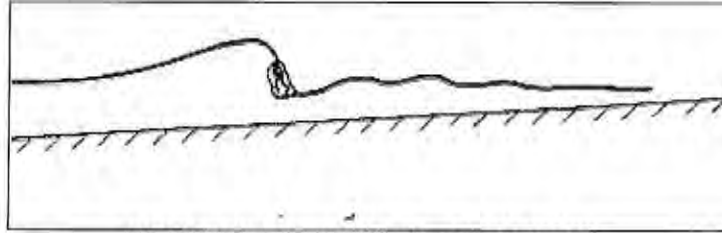


Figura 10: Rompiente tipo Collapsing.
(Fuente: Ref. 10).

- Rompimiento tipo Surfing u Oscilación (ver Figura 11)

"El frente de la onda y la cresta permanecen relativamente lisos y la onda se desliza por el contorno con pequeña producción de espuma, burbujas y turbulencia". (Ref. 10).

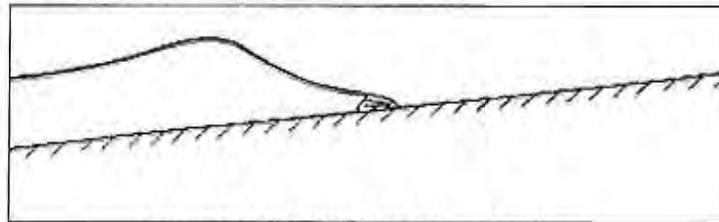


Figura 11: Rompiente tipo Surfing.
(Fuente: Ref. 10).

En base al número de Iribarren se clasifican los tipos de rompientes de acuerdo a la Tabla 3.

Tabla 3: Clasificación de rompientes según número de Iribarren.
(Fuente: Ref. 10).

Tipo de rompiente	I_r	I_{rb}
Descrestamiento	≤ 0.46	≤ 0.4
Voluta	0.46 – 2.5	0.4 – 1.5
Colapso	2.5 – 3.3	1.5 – 2.0
Oscilación	≥ 3.3	≥ 2.0

La determinación del tipo de rompimiento resulta trascendental, sobre todo para proyectos de regeneración de playas, diseño de obras de abrigo y costeras.

En el caso de la regeneración de Playa El Papagayo, interesa determinar el tipo de rompiente obtenida luego de la regeneración (asumiendo regeneración por relleno artificial) y que estará relacionada con el tamaño del grano del material de relleno. Por lo tanto, uno de los factores operacionales que se deben tener en cuenta al momento de la toma de decisiones en proyecto de regeneración de playas. Comúnmente se considera que las rompientes de tipo descrestamiento y a lo sumo voluta, son seguras y las del tipo colapso y oscilación no son recomendadas para los bañistas, porque presentan corrientes de retorno que pueden ser peligrosas, tal como los rip currents y undertow.

3.3.2 DEFINICION DE ESPECTROS

Un estado de mar es irregular y puede descomponerse en una serie infinita de olas regulares, que pueden caracterizarse mediante espectros. La forma que poseen los espectros depende mayoritariamente de las condiciones de generación del oleaje, influyendo directamente la velocidad del viento, duración y largo fetch, profundidad del agua y tipo de tormenta. Una de las características que se mantiene constante, es que todo espectro alcanza un máximo de energía para alguna frecuencia y disminuye ante frecuencias mayores y menores.

Se reconocen dos tipos generales de espectros, denominados espectros en una dimensión (1D) y espectros en dos dimensiones (2D). Los espectros 1D, son conocidos como espectros de frecuencias y de sus grandes deficiencias es que resumen en una dirección promedio la incidencia del oleaje en la zona de medición. Esto conlleva a que al momento de hacer una propagación, sólo vendría desde una dirección las ondas incidentes. A modo de ejemplo en la Figura 12, se presenta un espectro unidimensional.

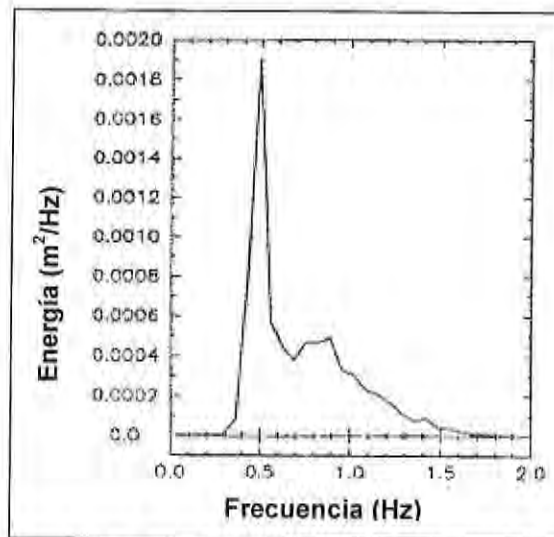


Figura 12: Ejemplo de espectro de frecuencia.
(Fuente: Ref. 29).

Los espectros 2D, también conocidos como bidimensionales o direccionales, representan la energía para cada desnivelación instantánea y frecuencia desde su respectiva dirección de aproximación al punto de medición. Un ejemplo de este tipo de espectros se muestra en la Figura 13.

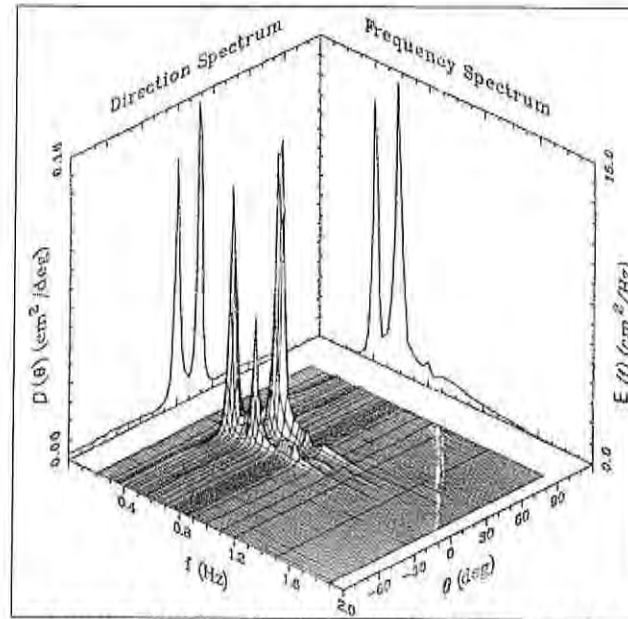


Figura 13: Ejemplo de espectro direccional.
(Fuente: Ref. 29).

3.3.3 ESPECTROS DE FRECUENCIA MÁS UTILIZADOS

(a) Generalidades

Una de las maneras más simples de representar un estado de mar¹, es considerar que corresponde a una superposición lineal de infinitos trenes de onda sinusoidales de amplitudes a_{mn} , frecuencias f_m , direcciones α_n y fases ε_{mn} . De este modo se plantea que la desnivelación instantánea de un punto dado y en cualquier instante, responde a la ecuación 57.

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} [k_m (x \cos \alpha_n + y \sin \alpha_n) - 2\pi f_n t + \varepsilon_{mn}] \quad \text{Ecuación 56}$$

Donde k_m corresponde al número de onda.

En términos generales se plantea que para espectros bimodales la densidad de energía se comporta de acuerdo a la ecuación 58.

$$S(f, \alpha) \cdot \Delta f \cdot \Delta \alpha = \frac{E[a_{mn}^2]}{2} \quad \text{Ecuación 57}$$

Donde E representa la esperanza matemática.

Para espectros de frecuencia la densidad de energía responde a la siguiente ecuación:

¹ Corresponde al oleaje formado por la acción directa y continuada del viento, caracterizándose por su gran irregularidad.

$$S(f) \cdot \Delta f = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E[a_{mm}^2]}{2} \quad \text{Ecuación 58}$$

En ocasiones es común expresar la densidad de energía (S) en función de la frecuencia angular (ω). La forma de calcular S es lo que diferencia los tipos de espectros utilizados. De forma general se puede obtener el momento espectral de orden n , que matemáticamente se expresa de acuerdo a la ecuación 60 y con la ecuación 61 se puede determinar la altura significativa espectral.

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad \text{Ecuación 59}$$

$$H_{m0} \cong 4\sqrt{m_0} \quad \text{Ecuación 60}$$

(b) Espectro de Pierson Moskowitz

Pierson y Moskowitz (1964) (Ref. 10) basándose en datos de campo y los avances obtenidos por Phillips (1958) y Kitaigorodskii (1962), un espectro para un oleaje completamente² desarrollado. Este se basa en la velocidad del viento (U) y considera que la densidad de energía puede expresarse por la ecuación 62.

$$S(\omega) = 0.0081 g^2 \omega^{-5} e^{-0.74 \left(\frac{g}{\omega U} \right)^{-1}} \quad \text{Ecuación 61}$$

Donde:

- g : Aceleración de gravedad.
- ω : Frecuencia angular.
- U : Velocidad del viento a una altura de 19.5 m.

(c) Espectro de Jonswap y la modificación de Donelan

Recibe su nombre en base a un proyecto de investigación denominado "Join North Sea Wave Analysis Project" y en la actualidad es uno de los espectros de mayor utilización. En términos generales es una extensión del espectro de Pierson y Moskowitz, ampliando su utilidad para oleaje limitado por el fetch. Para su formulación se realizaron mediciones en el Mar del Norte entre los años 1968 y 1969. Hasselmann (1973) propone la siguiente ecuación de la densidad de energía.

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} e^{-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-1}} \gamma^{\delta} \quad \text{Ecuación 62}$$

² Corresponde a un oleaje que ya abandonó la zona de generación.

$$\delta = \frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma_0^2 \omega_p^2}$$

Ecuación 63

Donde:

- α : Coeficiente de ajuste.
- g : Aceleración de gravedad.
- ω : Frecuencia angular.
- γ : Ancho espectral.
- σ^2 : Coeficiente de ajuste.

Donelan (1985) propone una forma espectral del JONSWAP para cuatro parámetros, dada por la siguiente formulación:

$$S(\omega) = \beta g^2 \omega_p^{-1} \omega^{-4} e^{-\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}} \gamma^\delta$$

Ecuación 64

$$\delta = e^{-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma_0^2 \omega_p^2}}$$

Ecuación 65

Donde $\beta = 0.006 v^{0.55}$; para $0.83 < v < 5.0$, además

$$\gamma = \begin{cases} 6.489 + 6 \log v & \text{para } 1 \leq v < 5 \\ 1.7 & \text{para } 0.83 < v < 1 \end{cases}$$

Esta formulación toma un valor $\gamma = 1.7$ cuando el oleaje esta completamente desarrollado.

(d) Espectro TMA (Shallow Water).

Cuando las ondas ingresan en un régimen de profundidades reducidas, se tornan asimétricas y comienzan a predominar los efectos de interacción entre las componentes del tren de ondas. Debido a estos fenómenos, es que los espectros comentados anteriormente no tienen validez cuando se está en estas condiciones. *Kitaigorodskii (1975)*, propone una formulación espectral capaz de considerar estos efectos, tomando como base el espectro tipo JONSWAP y multiplicándolo por una función de profundidad.

El nombre de este espectro es debido a las tres campañas de mediciones de campo para validarlo (TEXEL, MARSEN y ARSOLE) (Ref. 10). Finalmente se plantea que el espectro TMA responde a la siguiente formulación:

$$S(\omega, h) = S_j(\omega) \cdot \phi(\omega')$$

Ecuación 66

Donde $S_j(\omega)$ corresponde al espectro JONSWAP y $\phi(\omega')$ es la función de profundidad, dada por la ecuación 68.

$$\phi(\omega') = f^{-2} \left[1 + \frac{2\omega'^2 f}{\sinh(2\omega'^2 f)} \right] \quad \text{Ecuación 67}$$

Donde ω'^2 adopta un valor de:

$$\omega'^2 = \frac{\omega^2 d}{g} = kh \tanh(kh) \quad \text{Ecuación 68}$$

3.3.4 METODOLOGÍAS DE TRANSFERENCIA ESPECTRAL

Existen diversos métodos de transferencia de oleaje, los cuales tienen ventajas y desventajas entre sí. A continuación y de manera resumida se explica cada uno de los métodos de transferencia espectral de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras, tratados en *Nicolau (2004)*.

(a) *Purista*

Este método se basa en la propagación del registro completo de oleaje, es decir, se propaga cada ola con cada periodo registrado para la dirección exacta en la que fue medida. De este modo, si se tiene un registro de olas direccional de 20 años medidos cada 2 horas, se contaría con 87600 datos y por lo tanto sería necesario realizar igual número de propagaciones hasta el punto de interés. En conclusión el método purista ejecuta transferencias de espectros 2D, ya que conserva la dirección para cada ola con su respectivo periodo.

(b) *Cuasi Purista*

Se basa en la determinación de funciones de transferencia del oleaje tanto para la transformación de la dirección como de la altura de ola, considerando que el periodo se mantiene constante. Para determinarlas se realizan propagaciones de oleaje unitario desde aguas profundas, es decir, con altura igual a un metro, distintas direcciones y para distintos periodos.

Las funciones de transferencia son dependientes del periodo, por lo tanto si se propaga una ola con propiedades conocidas en aguas profundas (H, T y D) hacia aguas someras, la altura en el sitio de interés será igual a la multiplicación del coeficiente de transferencia y la altura en aguas profundas, de acuerdo al periodo. Similar procedimiento se ejecuta para la dirección.

Una de las ventajas que presenta este método es que reduce significativamente el número de propagaciones. Sin embargo, la gran desventaja que presenta es que al propagar oleaje unitario no se caracteriza en forma adecuada la zona de rompientes, pues en algunas zonas se obtienen olas que debería haber presentado rotura en un veril anterior al del punto de análisis. A pesar de esto, es uno de los métodos mayormente utilizados (Ref. 22).

(c) *Cuasi Purista Modificado*

Fundamentalmente emplea la misma metodología que el cuasi purista, pero considera para las propagaciones oleaje con distintas alturas, siendo estas de 1, 4 y 7 metros. Con esta incorporación se intenta reflejar de mejor modo el oleaje rompiente. Tanto este método como el cuasi purista modificado, son metodologías de transferencia espectral bidimensional.

(d) *Parámetros de Resumen*

Este método extrae de cada espectro de energía de oleaje en aguas profundas sus parámetros de resumen, es decir, altura significativa espectral (H_{m0}), periodo peak del oleaje (T_p) y dirección promedio de la energía del oleaje (MWD) y se realiza la propagación de cada parámetro de resumen como evento aislado.

3.3.5 RECOMENDACIONES

La transferencia de oleaje es sin duda uno de los factores determinantes a la hora de ejecutar estudios de las condiciones de oleaje en aguas someras. En Chile, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfica de la Armada, ha normado los estudios de oleaje con la publicación 3201 cuya tercera edición del año 2005 señala que *"La determinación de olas para el borde costero, se deberá realizar mediante el análisis de transferencia espectral direccional desde aguas profundas hacia el sitio de interés, aislando y transfiriendo los componentes del espectro mediante modelos numéricos de propagación de olas, o mediante cualquier otro método que permita tomar en cuenta distintas direcciones de incidencia del oleaje en el rango de períodos de 2 a 30 segundos. Los métodos anteriores también deberán considerar los principales efectos de la batimetría y de la línea de costa, tales como, la reducción de fondo, la refracción y la difracción, entre otros"* (Publicación 3210 3ª edición 2005, SHOA). De este modo se debe utilizar propagación del tipo espectral y conservar además las direcciones, por lo tanto es obligatorio una propagación de espectros bimodales.

Respecto de las metodologías de transferencias tales como, el método purista, cuasi purista, cuasi purista modificado y parámetros de resumen, se realizó un estudio (Nicolau 2004) del comportamiento de dichas metodologías para distintos casos de batimetría (Bahía profunda, Bahía somera y veriles rectos y paralelos entre sí).

Nicolau (2004) en su estudio *"Evaluación de Metodologías de Transferencia de Oleaje desde Aguas Profundas hacia Aguas Someras"* asistido por profesionales de la consultora Baird & Associates S.A.³, concluye:

- *"El método cuasi purista y cuasi purista modificado, no presentan grandes diferencias en los resultados de las propagaciones de espectros bimodales, siendo prácticamente iguales sus resultados"*.
- *"Como no existen muchas diferencias entre los métodos cuasi puristas y la metodología purista, y existen casos en que se comprobó que las metodologías cuasi puristas estiman con mayor precisión los parámetros de olas (si el método purista utiliza sólo una grilla para la transferencia), y además el tiempo de proceso computacional que utiliza el método purista es largamente superior al que utilizan los métodos cuasi puristas, es más eficiente efectuar transferencias por medio de los métodos cuasi puristas"*.

³ Precursora en conjunto con SHOA del proyecto Olas Chile.

En vista de lo anteriormente expuesto y considerando el tiempo de procesamiento computacional, es aceptable emplear métodos cuasi puristas, en alguna de sus dos versiones, para la transferencia espectral bimodal de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras.

3.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos es el proceso litoral de mayor relevancia en la evaluación de proyectos de regeneración y/o erosión de playas. La zona de rompientes determina la estabilidad y evolución de las playas, ya que es donde la mayor cantidad de sedimentos se ponen en suspensión y son transportados en alguna dirección (transversal o longitudinalmente a la playa).

Este transporte de material en suspensión puede deberse a corrientes u oleaje, siendo predominante la corriente en zonas de alta turbidez, tal como lo es la rompiente donde se generan las llamadas corrientes de resaca y de retorno, predominantes en el transporte transversal.

El transporte de sedimentos puede manifestarse como transporte de fondo y/o suspensión, dependiendo su presencia del tamaño del grano a transportar, así como también del tipo de flujo bajo el cual se encuentra dicha partícula. Los modos de movimiento del grano son tres:

- Rodadura y deslizamiento: Esta forma se genera cuando es superada la tensión tangencial crítica para la cual se inicia el movimiento.
- Saltación: A medida que la tensión tangencial aumenta, los granos comienzan a sobrepasarse entre sí (granos más rápidos a los más lentos), formando una lámina de sedimento cercana al fondo.
- Suspensión: Se presenta cuando la velocidad de corte excede la velocidad de caída del grano, levantándolo del lecho hasta una cierta altura en la cual es transportado.

Para describir cuando un grano, o conjunto de estos, comienza a moverse bajo un flujo es común recurrir al parámetro de Shields (ver Figura 14).

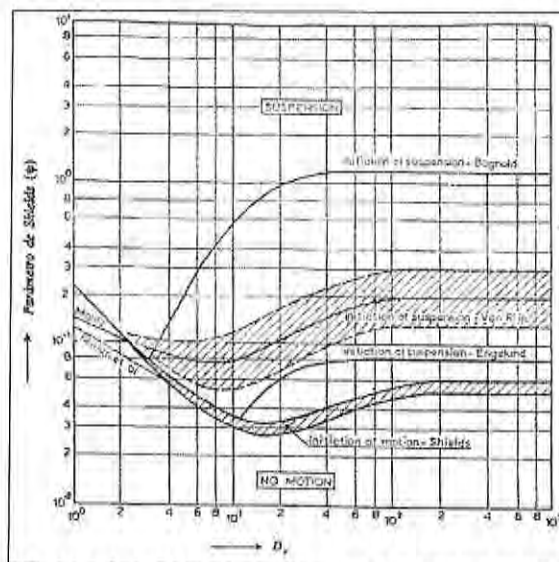


Figura 14: Parámetro del diámetro del grano v/s el parámetro de Shields.
(Fuente: Ref. 10).

3.4.1 SUPUESTOS

Algunas de las aproximaciones actuales en la solución de los casos de transporte longitudinal se basan en dos supuestos generales:

- Tridimensionalidad (ortogonalidad): Este supuesto hace hincapié en que el estudio de este tipo de fenómenos puede efectuarse analizando por separado las componentes transversal (perfil de playa) y longitudinal (planta de la playa).
- Consideraciones de escala: Para cada caso en análisis es necesario definir una escala temporal y espacial que se ajuste a una buena respuesta del fenómeno estudiado. De aquí se desprenden los análisis a largo y corto plazo de la evolución de playas. Cuando se analiza una playa en el largo plazo, lo que se intenta determinar es la posición de equilibrio que adopta ésta o, por otro lado, la forma que adoptaría si las dinámicas permanecieran constantes durante el tiempo suficiente. Una playa alcanzará de este modo un perfil de equilibrio (forma transversal) y una planta de equilibrio (forma longitudinal). Como análisis de corto plazo, cabe señalar que dentro de los más relevantes se encuentran la evaluación de formación de barras y la caracterización de la erosión del perfil de playa ante la presencia de una temporal.

3.4.2 TRANSPORTE LONGITUDINAL

(a) DEFINICIÓN Y CONCEPTOS DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL

Se define transporte longitudinal de sedimento, como el desplazamiento a lo largo de la playa del material sedimentario. Variados mecanismos son los que originan dicho movimiento, donde se destacan los siguientes:

- Oblicuidad del oleaje en rotura.
- Gradiente de sobre elevación de altura de ola (variación espacial del set-up)
- Variación del ángulo de incidencia del oleaje.
- Olas de largo período.

Un parámetro importante dentro del transporte longitudinal de sedimentos, es la denominada profundidad activa⁴, que por definición es aquella zona donde el transporte longitudinal tiende a cero. Su determinación depende principalmente de la altura de ola $H_{s0.137}$ que corresponde a la altura de ola que es superada sólo 12 horas al año.

(b) FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL TRANSPORTE LONGITUDINAL

Para determinar el transporte longitudinal de sedimentos se puede recurrir a diversas formulaciones matemáticas que se basan en distintas hipótesis de partida (flujo de energía o determinación del campo de corrientes). De todos modos se debe considerar que la cantidad de partículas en movimiento también es un parámetro que puede ser medido directamente en el lugar de estudio. Dentro de los métodos basados en el flujo de energía uno de los más utilizados es el formulado por el Coastal Engineering Research Center de Estados Unidos (CERC 1984), que establece que el transporte longitudinal potencial de sedimentos, responde a la siguiente ecuación:

⁴ Para más información ver sección 6.3.3 HIDRODINÁMICA DEL PERFIL DE PLAYA.

$$Q_l = K \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16k^2(\rho_s - \rho)(1-n)} \right) H_b^{\frac{3}{2}} \sin(2\alpha_b)$$

Ecuación 69

Donde:

- K : Es un coeficiente de proporción.
 ρ : Es la densidad de mar.
 g : Aceleración de gravedad.
 ρ_s : Densidad del sedimento.
 k : Índice de rompimiento.
 n : Porosidad del sedimento.
 H_b : Altura de ola rompiente.
 α_b : Es el ángulo de incidencia de la ola rompiente.

Para obtener buenos resultados con la formulación del *CERC (1984)*, es de crucial importancia la caracterización de la zona de rompientes. Sin embargo, existen algunas modificaciones que trasladan la altura de ola rompiente hacia costas afuera. Su desarrollo teórico se

Además de la formulación del *CERC (1984)*, existen otras formulaciones ampliamente empleadas tales como *Bagnol (1981)*, *van Rijn (1986)*, *Kamphuis (1990)* (The Queen's Formula).

3.4.3 TRANSPORTE TRANSVERSAL

(a) DEFINICIÓN Y CONCEPTOS DEL TRANSPORTE TRANSVERSAL

El transporte transversal de sedimentos es el movimiento de las partículas de forma perpendicular a la línea de costa. Este es el responsable del comportamiento estacional de las playas, es decir, del enriquecimiento de arena en la zona alta de la playa durante el verano y empobrecimiento de ésta en invierno, generando barras a lo largo del perfil. Uno de los conceptos de mayor relevancia es la profundidad de cierre⁵, que por definición es aquella zona donde los desplazamientos transversales de las partículas por efectos de oleaje son despreciables.

(b) FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL TRANSPORTE TRANSVERSAL

Actualmente la evaluación del transporte transversal de sedimentos se emplea en la determinación de los perfiles de equilibrio de una playa, lo que corresponde a un fenómeno de largo plazo.

Existen múltiples formulaciones para la determinación de los perfiles de equilibrio, bajo variadas consideraciones tales como, playas reflejantes, con difracción, refracción, mareas y combinación de los fenómenos anteriores. Una de las formulaciones más clásicas de los perfiles de equilibrio corresponde a la desarrollada por *Dean (1977)* (ecuación 71). Si bien su forma matemática es

⁵ Para más información ver sección 6.3.3 HIDRODINÁMICA DEL PERFIL DE PLAYA.

sencilla, ésta es capaz de representar muy bien (Ref. 19) el perfil siendo ésta una de sus grandes ventajas.

$$h = Ax^2$$

Ecuación 70

Esta ecuación asocia a la profundidad (h) a una cierta distancia de la costa (x) y a un parámetro constante A , que depende de las características del sedimento constituyente de la playa, entre otros.

4 CARACTERIZACIÓN DEL MEDIO

4.1 OLEAJE

4.1.1 GENERALIDADES

Las costas chilenas se caracterizan por tener un oleaje de variadas condiciones, siendo sus fuentes principales los Swell del tercer (Sur) y cuarto cuadrante (Norte).

El Swell del Norte se caracteriza por presentar un oleaje de periodos que van desde los 16 a 25 segundos. Estas olas son comunes de encontrar en época estival en nuestras costas y son generadas en Islas Aleutianas. Por otro lado el Swell del Sur se caracteriza por tener un oleaje de periodos más cortos (entre 10 a 14 segundos), sin embargo, pueden generarse olas de gran altura que son comunes de encontrar en los meses de invierno.

Además de las condiciones de mar de fondo (Swell), las olas en las costas chilenas se ven influenciadas por la generación local de oleaje (Sea) con bajos periodos, que van desde los 6 a 10 segundos.

Habitualmente los estudios de oleaje se realizan de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 15, pero para el desarrollo del presente proyecto de título se abordó el estudio de oleaje en dos etapas. En la primera de ellas se ha realizado la transferencia desde aguas profundas hasta aguas intermedias (frente la zona de estudio) y se realizó un análisis estadístico el cual se detalla en los siguientes puntos del presente capítulo. Mientras que la segunda parte consiste en el análisis de clima extremo y determinación de la ola de diseño, siendo presentados los resultados en el Capítulo 6.

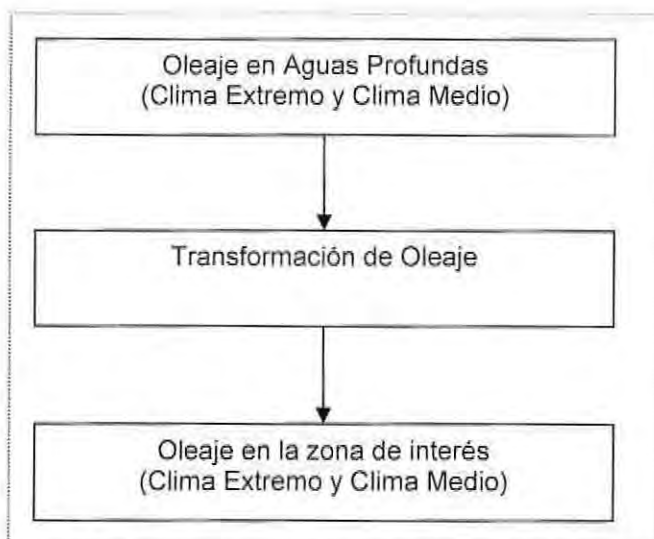


Figura 15: Esquema general para el desarrollo de oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia)

4.1.2 OLEAJE EN PLAYA EL PAPAGAYO

(a) OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS

Para el correcto desarrollo de cualquier proyecto de ingeniería marítima es recomendable contar con estadísticas de 20 años de duración⁶. Se utilizará una metodología de propagación de oleaje espectral desde aguas profundas hacia aguas someras mediante un análisis semipurista y empleando la base de datos de Olas Chile⁷ en un nodo ubicado costa afuera de Valparaíso (ver Figura 16).

A modo de ejemplo se presentan tablas de incidencia altura por periodo, altura por dirección y periodo por dirección, así como también las rosas de oleaje para altura y periodo, para dicho nodo con la base de datos adquiridas por la Universidad de Valparaíso con una data desde el 2000 al 2004, las cuales concuerdan con los últimos 5 años de estadística en Playa El Papagayo.

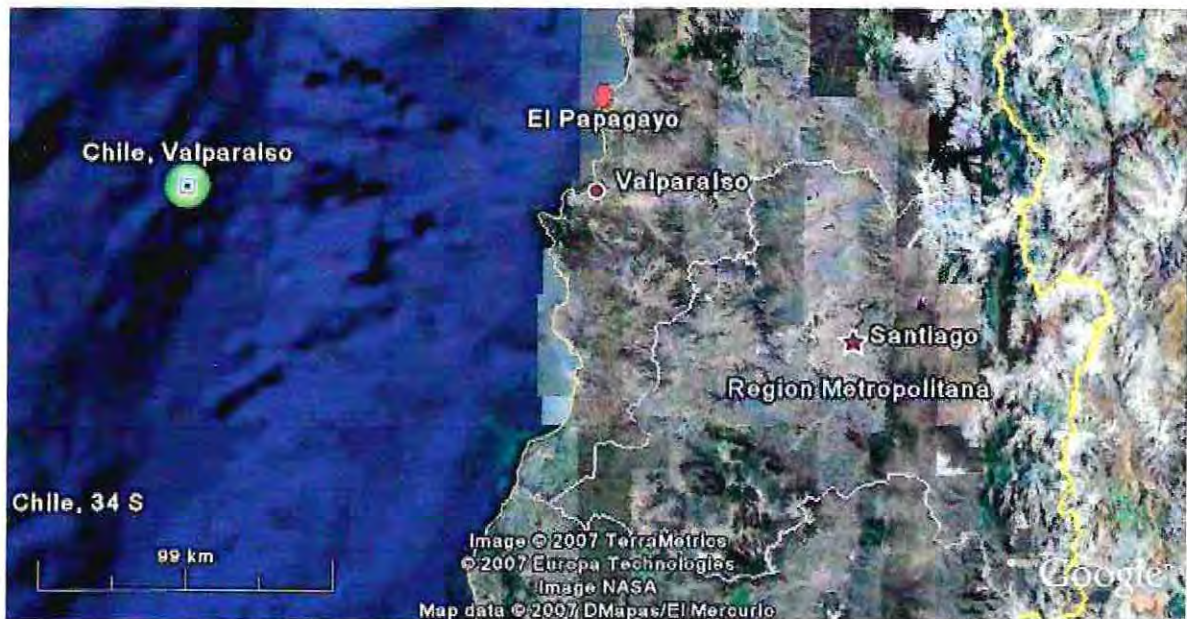


Figura 16: Ubicación nodo de estadísticas en aguas profundas.

(Fuente: Elaboración Propia).

⁶ Publicación SHOA 3201, 3ª edición 2005.

⁷ Gracias a la facilitación por parte de Baird & Associates S.A y al Señor Patricio Monárdez Santander.

Tabla 4: Tabla de incidencia de oleaje de altura y periodo, costa afuera (Valparaiso).

Wave Distribution By Hight and Period (All Directions)
Location: Nodo Valparaíso
Date Range: 01 Jan 2000 12AM to 31 Dec 2004 09PM

Wave Height [m]	Wave Period [s]										Total	C (%)	
	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	22,00			24,00+
0,00 - 0,20												100,00	100,00
0,20 - 0,40												100,00	100,00
0,40 - 0,60												100,00	100,00
0,60 - 0,80												100,00	100,00
0,80 - 1,00			0,02	0,01	0,03							0,05	100,00
1,00 - 1,20			0,03	0,20	0,13	0,08	0,03					0,47	99,95
1,20 - 1,40			0,02	0,43	0,57	0,18	0,06	0,03				1,29	99,47
1,40 - 1,60			0,07	0,92	1,01	0,30	0,07	0,02				2,38	98,18
1,60 - 1,80	0,07	0,02	0,35	1,52	1,53	0,86	0,31	0,09				4,75	95,80
1,80 - 2,00	0,07	0,06	0,23	2,44	3,54	0,99	0,48	0,08				7,88	91,05
2,00 - 2,20	0,09	0,17	0,31	3,02	4,13	1,42	0,53	0,08				9,75	83,17
2,20 - 2,40	0,11	0,27	0,38	2,83	4,65	2,00	0,62	0,03				10,89	73,42
2,40 - 2,60	0,03	0,27	0,29	2,85	5,36	1,74	0,86	0,12	0,01			11,50	62,53
2,60 - 2,80	0,04	0,26	0,35	2,18	5,58	1,47	0,42	0,05	0,01			10,37	51,03
2,80 - 3,00	0,03	0,32	0,33	1,88	4,95	1,68	0,33	0,05	0,01			9,58	40,67
3,00 - 3,20	0,01	0,17	0,34	1,18	4,04	2,05	0,27	0,03				8,09	31,09
3,20 - 3,40		0,34	0,30	0,94	3,33	1,79	0,33	0,05				7,06	23,00
3,40 - 3,60		0,23	0,21	0,90	2,29	1,22	0,32	0,02				5,19	15,93
3,60 - 3,80		0,17	0,23	0,42	1,63	1,08	0,05	0,01				3,59	10,74
3,80 - 4,00		0,17	0,13	0,13	1,04	0,74	0,03					2,24	7,16
4,00 - 4,20		0,10	0,05	0,12	0,72	0,49	0,06	0,01				1,54	4,92
4,20 - 4,40		0,08	0,06	0,12	0,60	0,34	0,03					1,23	3,38
4,40 - 4,60		0,03	0,05	0,12	0,32	0,27	0,07					0,86	2,15
4,60 - 4,80		0,04	0,07	0,04	0,17	0,23	0,05					0,60	1,29
4,80 - 5,00		0,04	0,03		0,10	0,16	0,05					0,38	0,68
5,00 - 5,20		0,01	0,05		0,03	0,05	0,02					0,16	0,31
5,20 - 5,40						0,05	0,01					0,07	0,15
5,40 +			0,05			0,03						0,08	0,08
Total	0,44	2,75	3,94	22,24	45,72	19,21	5,01	0,66	0,02	0,00	0,00	100,00	
C (%)	100,00	99,56	96,80	92,86	70,63	24,90	5,69	0,68	0,36	0,03	0,03		

Meta Data

0,00% Calm Conditions (Wave Height < 0,00 m and Wave Period < 4,00 s)
 Number of Records this selection: 14616
 Total record used in selected interval including calms): 14616
 Missing data (not included in calculation): 0
 Wave height: Max: 6.44 Min: 0.91 Mean: 2.69
 Wave period: Max: 21.57 Min: 4.73 Mean: 12.78

Legend

Row and column percentages have the following meanings:
 Total - based on number of records used in selected interval
 C - percent exceedance derived from "Total"
 Frequencies of occurrence are reported in "percentage"

Tabla 6: Tabla de incidencia de oleaje de periodo y dirección, costa afuera (Valparaíso).

Wave Distribution By Period and Direction
Location: Playa El Papagayo
Date Range: 01 Jan 1985 12AM to 31 Dec 2004 09PM

Dirección [°]	Period [m]												Total	C (%)	
	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00+			
180,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00				
190,00					0,10	0,16	0,08	0,05						0,39	99,61
200,00			0,01	0,02	0,17	0,76	0,18							1,13	98,48
210,00		0,02	0,60	1,08	2,38	6,34	1,77	0,42	0,09					12,70	85,79
220,00		0,03	0,78	1,39	6,92	15,85	7,00	1,48	0,13	0,02				33,60	52,19
230,00			0,06	0,32	5,72	12,60	6,12	1,45	0,22					26,48	25,71
240,00				0,21	2,65	5,54	2,23	0,95	0,11					11,70	14,01
250,00				0,16	1,66	2,12	0,77	0,26	0,04					4,99	9,01
260,00				0,15	0,85	0,68	0,45	0,23	0,04					2,40	6,61
270,00			0,01	0,06	0,54	0,50	0,26	0,10	0,01					1,48	5,14
280,00			0,02	0,08	0,36	0,37	0,11	0,01						0,95	4,19
290,00			0,02	0,14	0,23	0,30	0,07	0,02	0,01					0,79	3,40
300,00		0,01	0,07	0,07	0,26	0,14	0,08	0,01						0,63	2,77
310,00		0,01	0,17	0,05	0,13	0,19	0,07	0,01						0,62	2,15
320,00		0,01	0,18	0,07	0,12	0,15	0,03	0,02						0,58	1,57
330,00		0,09	0,28	0,07	0,10	0,08	0,05	0,01						0,69	0,88
340,00		0,10	0,20	0,06	0,08	0,07	0,03	0,01						0,54	0,34
350,00		0,04	0,20	0,06	0,02	0,03								0,34	0,00
360,00															
Total	0,00	0,31	2,59	3,97	22,27	45,87	19,27	5,03	0,65	0,02	0,00	0,00		100,00	
C (%)	100	99,69	97,10	93,12	70,85	24,98	5,70	0,67	0,02	0,00	0,00	0,00			

Meta Data

0,00% Calm Conditions (Wave Height < 0,00 m and Wave Period < 0,00 s)
 Number of Records this selection: 14616
 Total record used in selected interval: 14616
 (Including calms):
 Missing data (not included in calculation): 0
 Wave period (all data): Max: 21.57 Min: 4.73 Mean: 12.78
 Wave period (scatter only): Max: 21.57 Min: 4.73 Mean: 12.78

Legend

Row and column percentages have the following meanings:
 Total - based on number of records used in selected interval
 C - percent exceedance derived from "Total"
 Frequencies of occurrence are reported in "percentage"

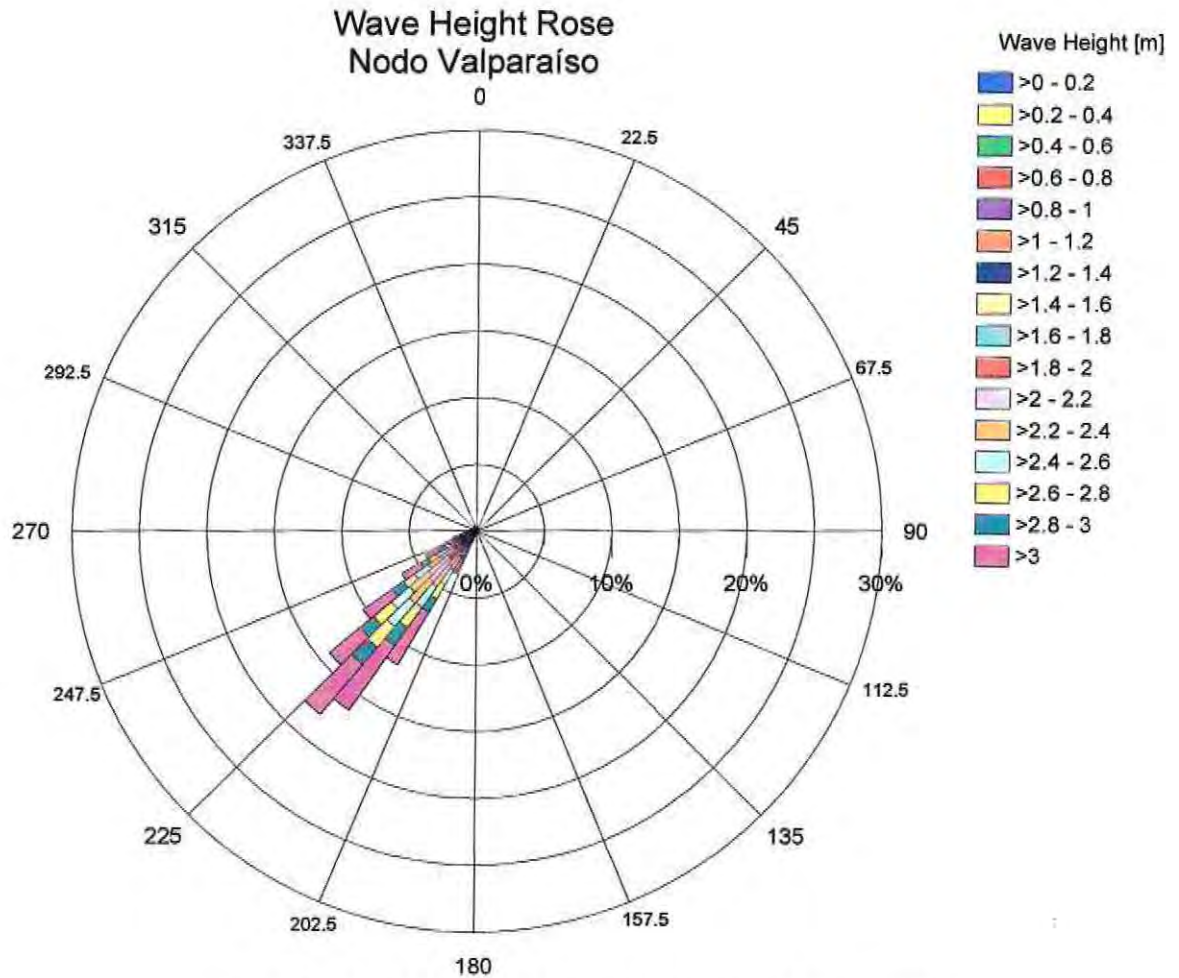


Figura 17: Rosa de altura oleaje costa afuera (Valparaíso).

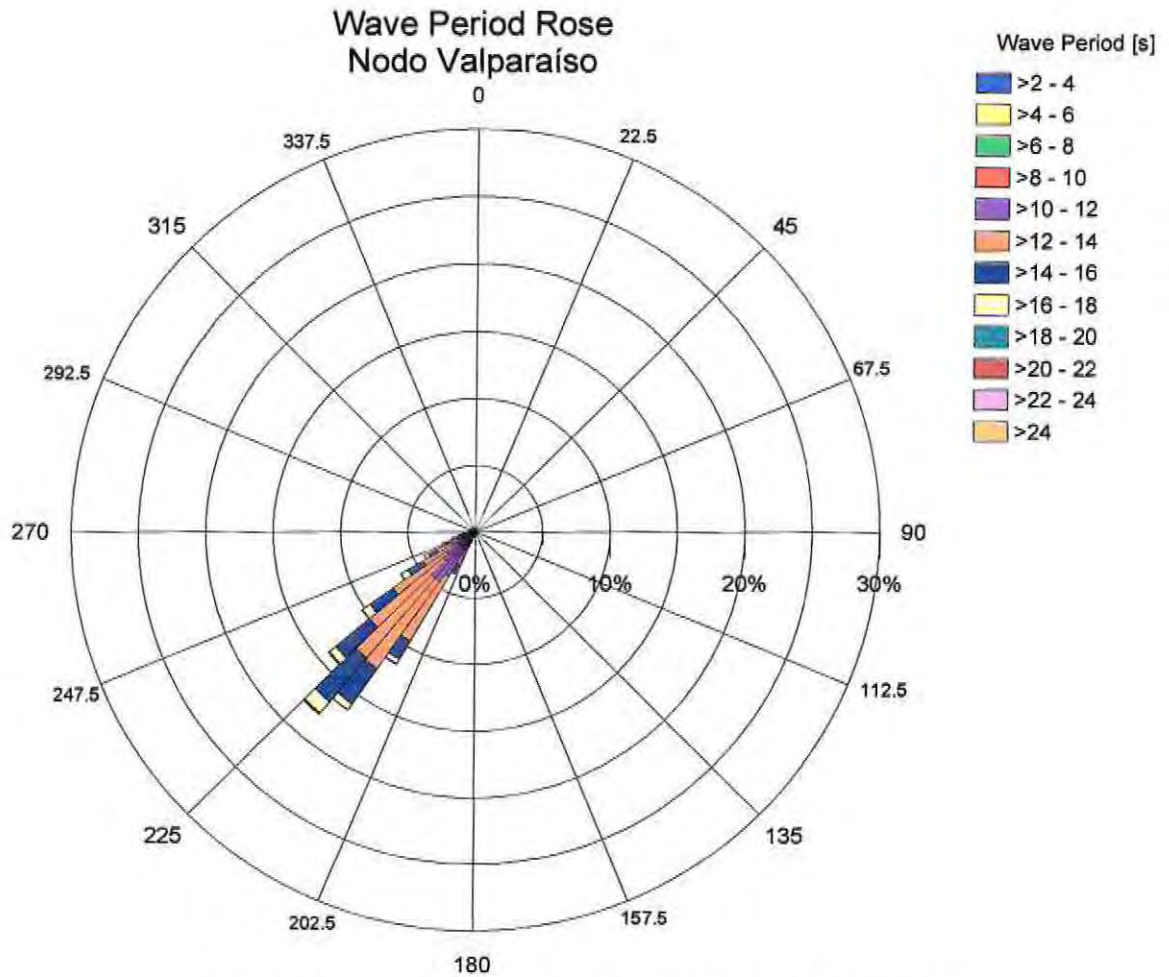


Figura 18: Rosa de periodo oleaje costa afuera (Valparaíso).

(b) **METODOLOGÍA DE TRANSFERENCIA**

Para realizar la propagación espectral se utilizó el modelo numérico de diferencias finitas STWAVE, que se basa en un esquema de ecuaciones promediadas en la vertical y en la fase. El modelo permite simular refracción, Shoaling, interacción ola a ola, rompimiento y difracción. En el caso del rompimiento emplea el criterio de *Miche (1951)*, con lo que caracteriza la altura de ola máxima rompiente en un punto para una profundidad dada. Si bien las ecuaciones de gobierno del modelo numérico incluyen la transferencia lateral de energía entre celdas, no se considera el cambio de dirección del oleaje. Por este motivo es que la difracción física no es plenamente representada en STWAVE, sino que se realiza mediante una aproximación numérica. (Ref. 28, página 9)

En vista de estas consideraciones, se implementaron tres modelos para la realizar la propagación espectral de oleaje proveniente desde una rosa de 7 direcciones que van desde el SSW (192.5°) hasta el NNW (337.5°). La transferencia se realizó mediante la metodología semipurista, que consiste en la propagación de alturas de olas unitarias, abarcando periodos desde los 6 a los 24 segundos.

Cada uno de los modelos contó con dos grillas numéricas anidadas. La grilla principal fue configurada con una resolución de 150 metros, mientras que la otra tenía una resolución de 25 metros. Esta configuración se ha realizado en virtud de que un esquema numérico con grillas anidadas mejora la calidad de las soluciones en un área determinada de estudio, sin aumentar drásticamente el tiempo de cálculo.

De acuerdo al modelo empleado, cada grilla tuvo diversas orientaciones (ver Tabla 7 y Figura 19).

Tabla 7⁸: Orientaciones de las grillas numéricas empleadas.

(Fuente: Elaboración Propia).

Modelo	Dirección Grilla Principal	Dirección Grilla Anidada
SW	45°	45°
W	0°	0°
NW	315°	315°

⁸ Las direcciones denotadas en la Tabla 7 están referidas al cero matemático.

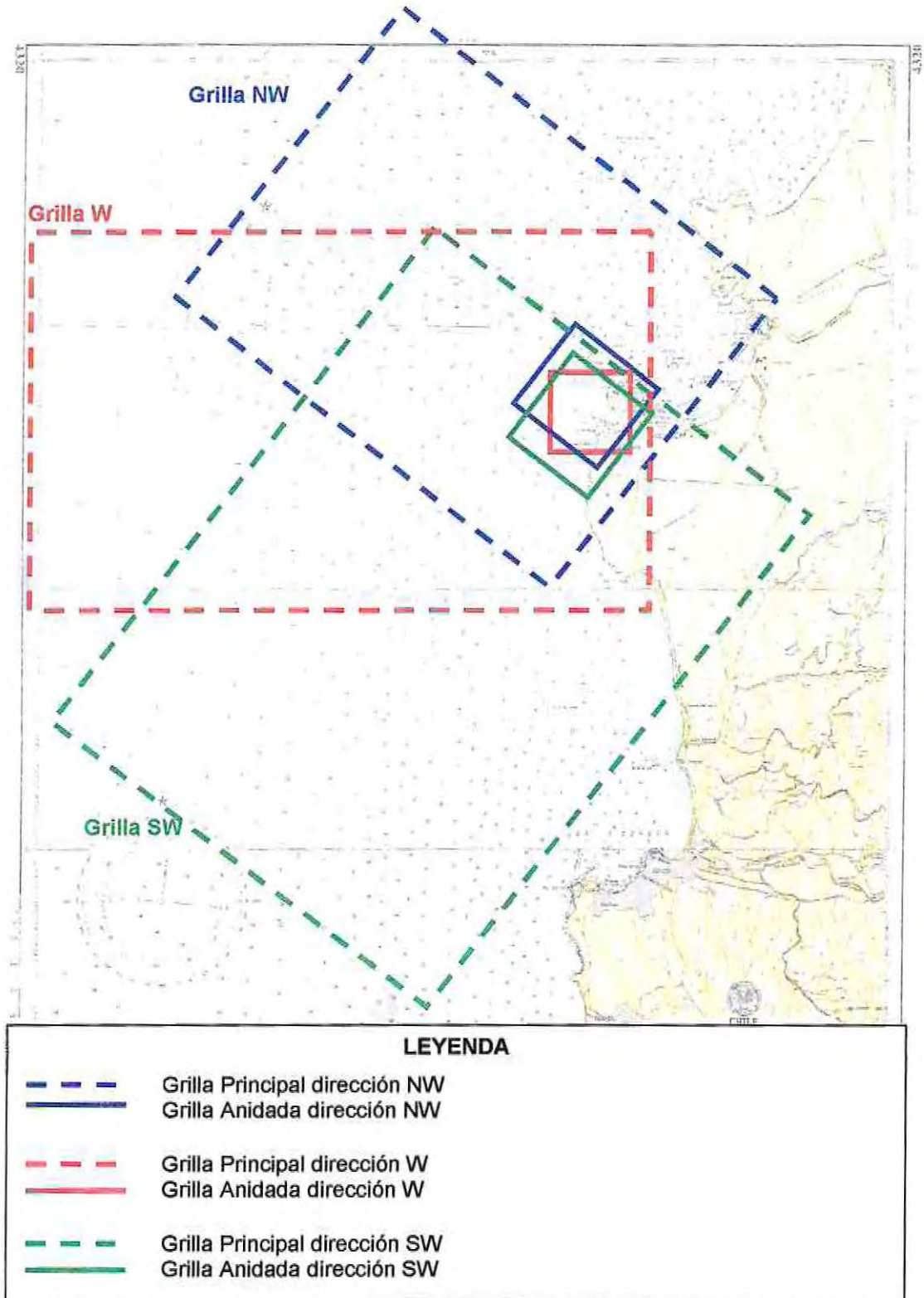


Figura 19: Esquema de emplazamiento de las grillas de propagación.
(Fuente: Elaboración Propia).

En cada una de las simulaciones implementadas se propagó oleaje desde distintas direcciones, considerando las limitaciones numéricas para el ángulo de incidencia del oleaje que impone STWAVE (Ref. 28). Por este motivo para cada modelo se han propagado los siguientes casos:

Tabla 8: Direcciones incidentes de oleaje propagadas.

(Fuente: Elaboración Propia).

Modelo	Dirección Offshore de Incidencia	Notación
SW	202.5	SSW
	225.0	SW
W	247.5	WSW
	270.0	W
	292.5	WNW
NW	315.0	NW
	337.5	NNW

La batimetría utilizada para la implementación de los modelos numéricos se obtuvo de dos fuentes de información. La primera consiste en la digitalización de la carta Náutica N° 4321, perteneciente al SHOA. La segunda consistió en la obtención de datos desde el software Global Mapper, perteneciente a la NASA y que aporta un levantamiento mundial de características satelitales con una buena precisión hasta la sonda de los 100 metros aproximadamente.

Luego de obtenidas estas bases de información y procesadas en un mismo datum (WGS 84), se mezclaron obteniendo la batimetría necesaria para el modelo (ver figuras de la 20 a la 22).

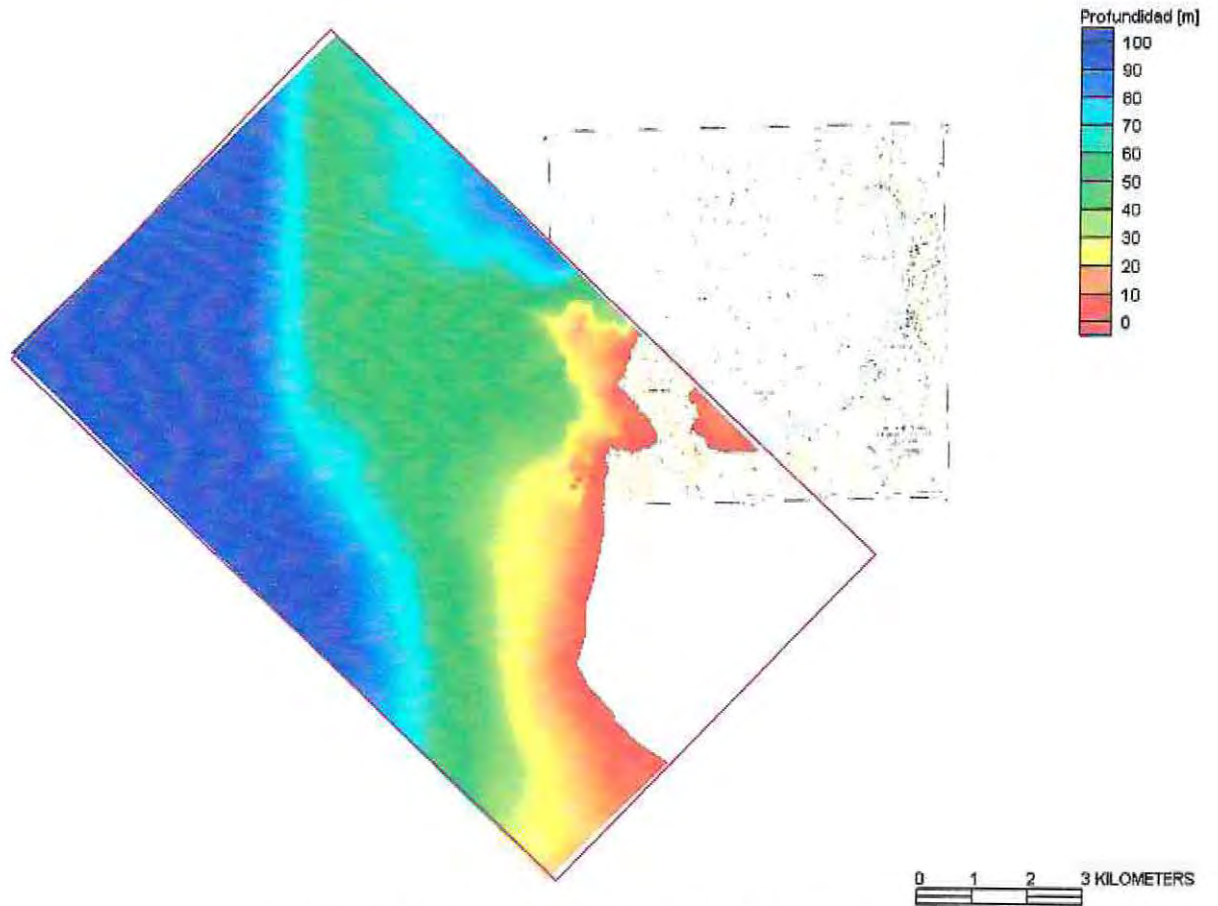


Figura 20: Grilla anidada para el modelo SW.
(Fuente: Elaboración Propia).

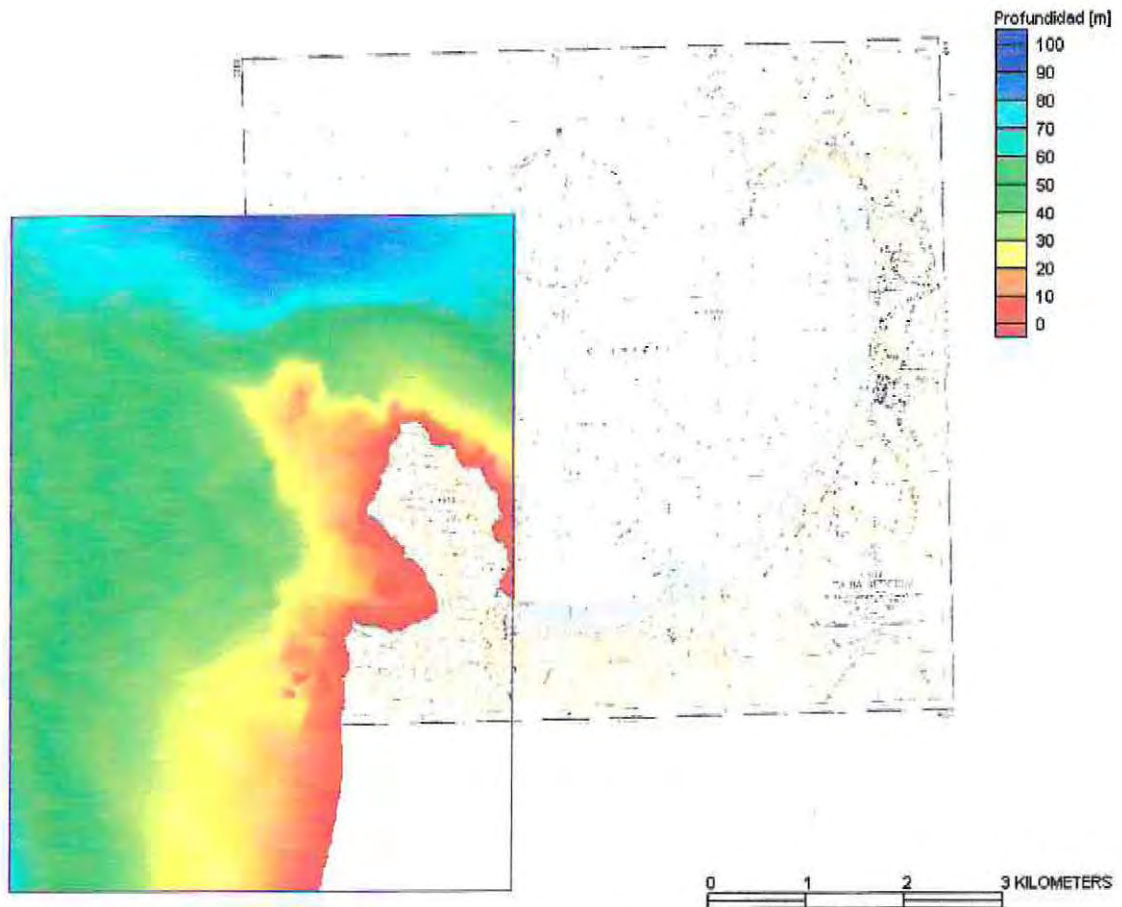


Figura 21: Grilla anidada para el modelo W.
(Fuente: Elaboración Propia).

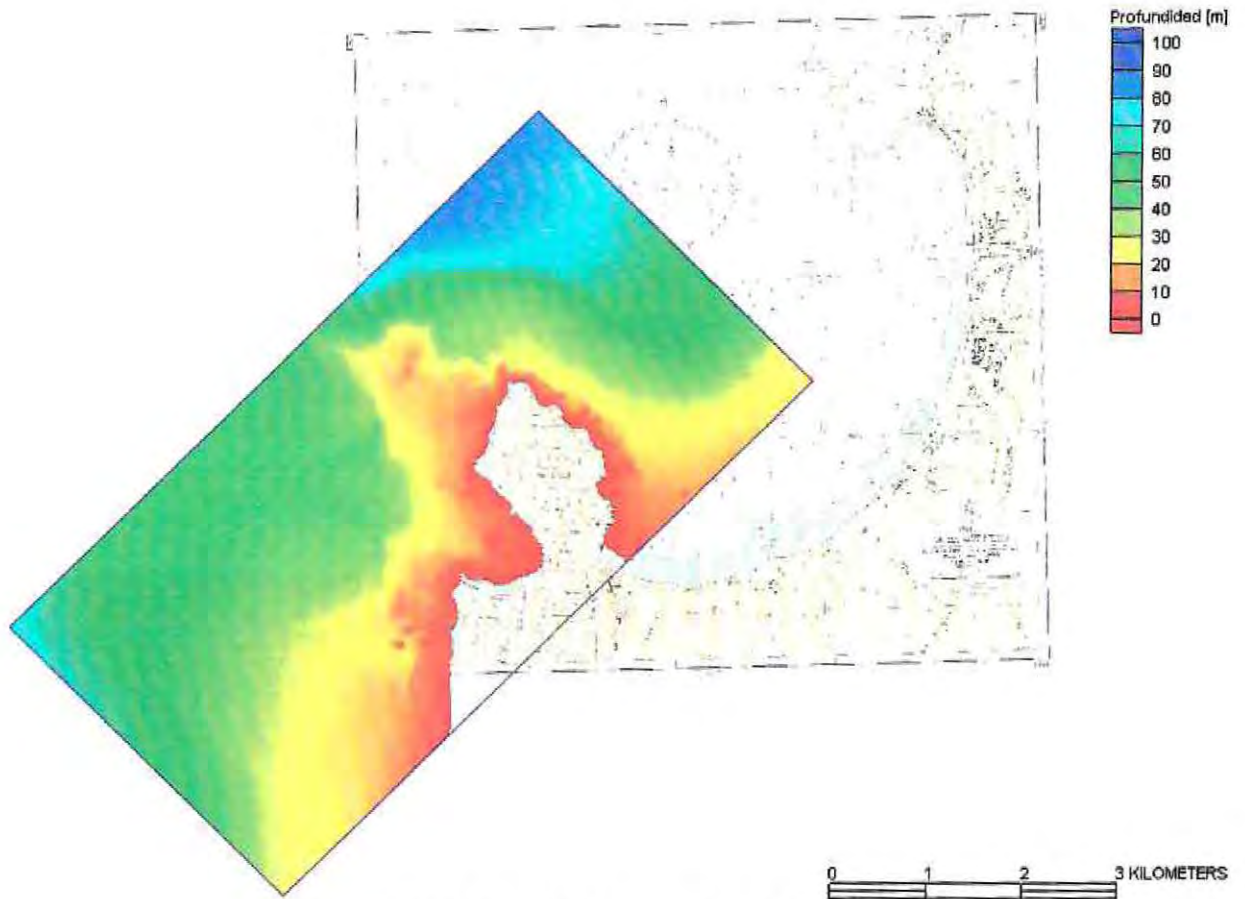


Figura 22: Grilla anidada para el modelo NW.
(Fuente: Elaboración Propia).

(c) RESULTADOS OBTENIDOS

A modo de ejemplo se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los modelos implementados para un oleaje con periodo $T_p = 14$ s.

Analizando las Figuras 23, 24 y 25, se aprecia un mayor efecto de refracción para las olas provenientes desde los 225° y los 315° que las provenientes desde los 270° . Esto se debe a la incidencia oblicua que tienen las olas, ya que la proveniente desde el W ingresa de manera perpendicular a la línea de costa.

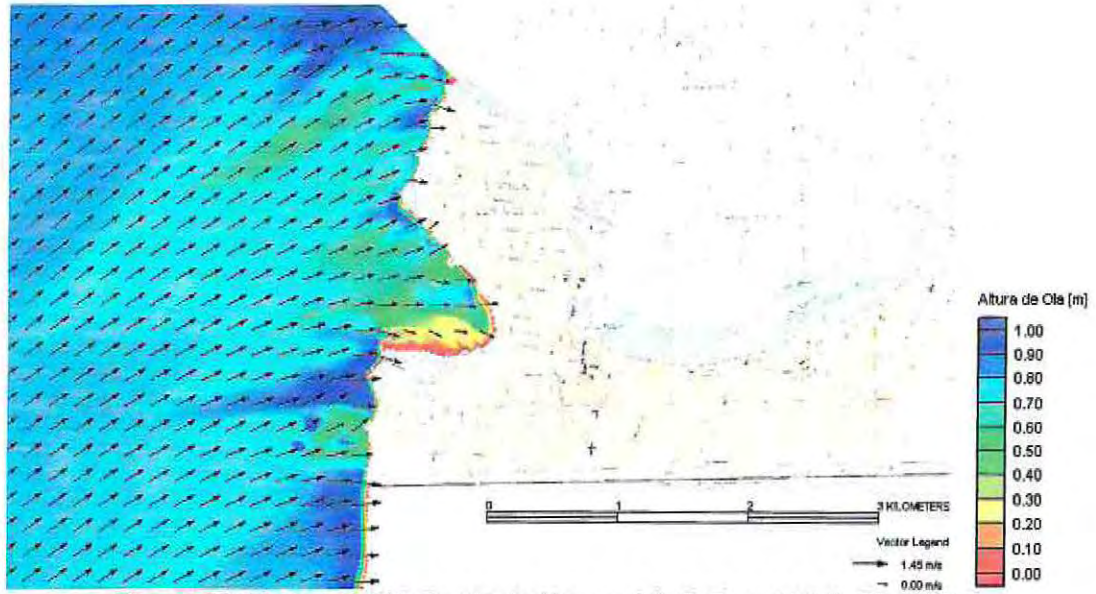


Figura 23: Propagación de oleaje $H_{mo} = 1$ [m], $T_p = 14$ [s], $Dir = 225^\circ$.
(Fuente: Elaboración Propia).

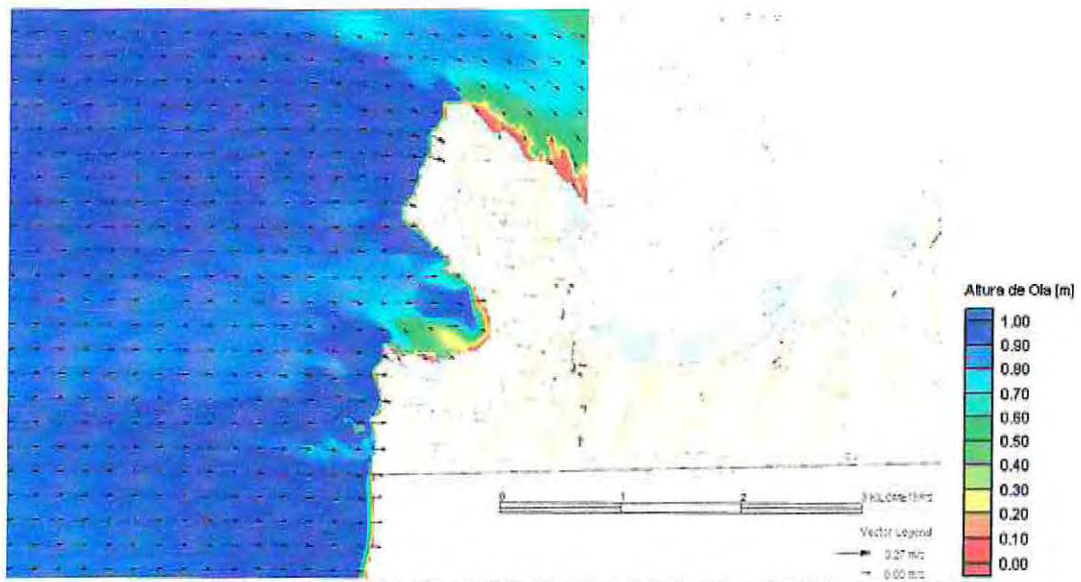


Figura 24: Propagación de oleaje $H_{mo} = 1$ [m], $T_p = 14$ [s], $Dir = 270^\circ$.
(Fuente: Elaboración Propia).

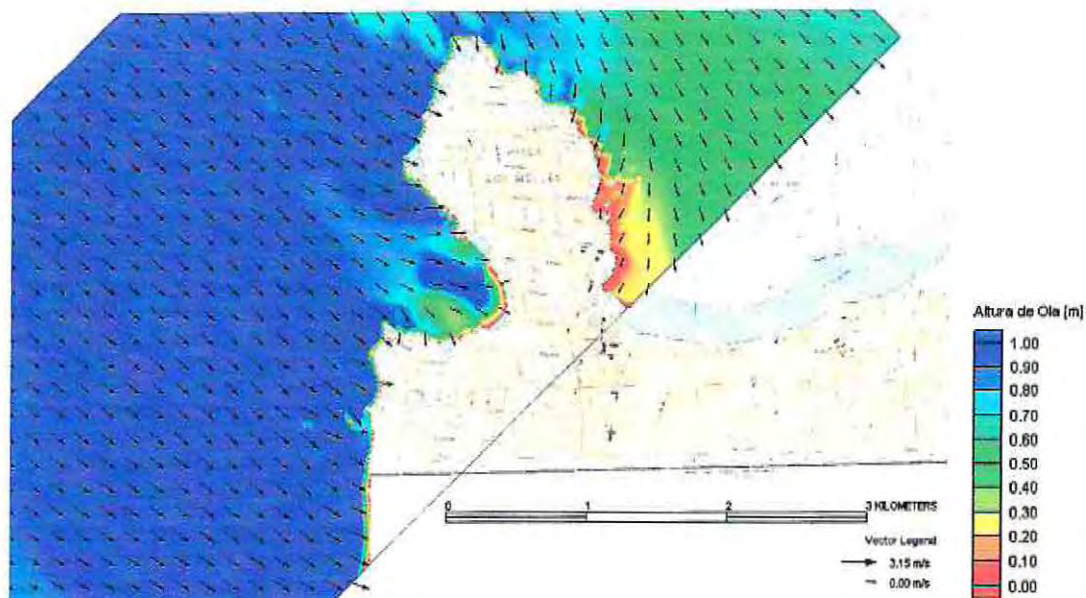


Figura 25: Propagación de oleaje $H_{mo} = 1$ [m], $T_p = 14$ [s], $Dir = 315^\circ$.
(Fuente: Elaboración Propia).

Para la determinación de las funciones de transferencia se extrajeron los datos de un punto (Nodo 1) frente a la Playa El Papagayo cuyas coordenadas se resumen en Tabla 9 y su emplazamiento se ilustra en la Figura 26.

Tabla 9: Coordenadas del punto de extracción de datos (Nodo 1).
(Fuente: Elaboración Propia).

Coordenadas	Valor [m]
Norte [UTM]	6370942
Oeste [UTM]	261735
Profundidad [NRS]	25

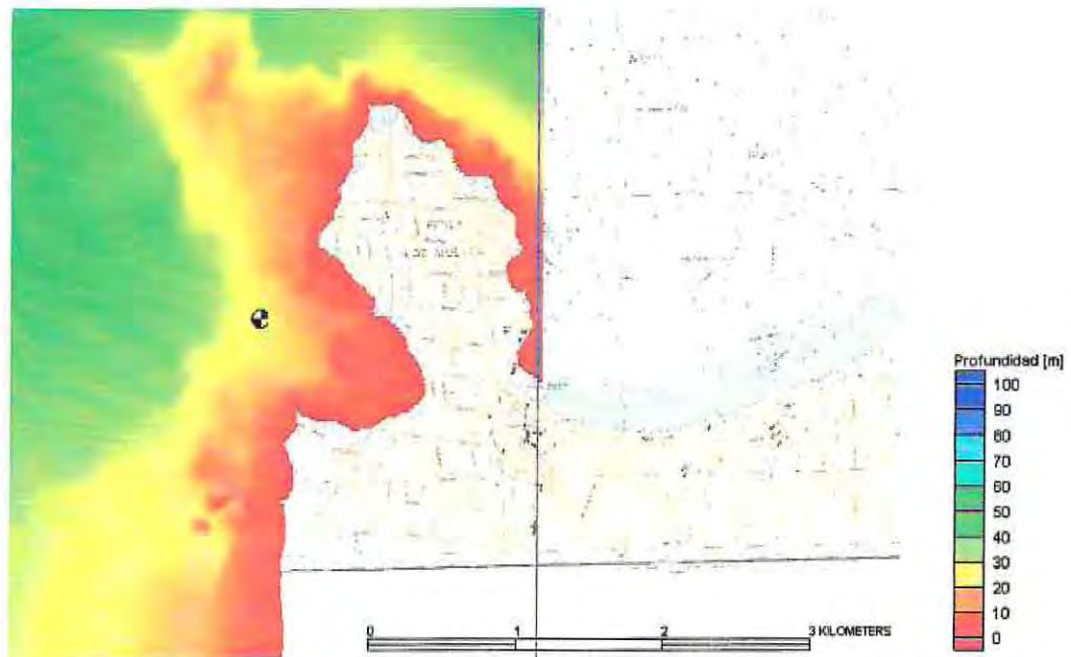


Figura 26: Ubicación punto de extracción de datos (Nodo 1).
(Fuente: Elaboración Propia).

Se obtuvieron funciones de transferencia para las direcciones y las alturas de oleaje de acuerdo al periodo peak.

Las funciones de transferencias en el dominio de las direcciones (ver Gráfico 1) indican que a medida que el periodo tiende a un valor más alto el tren de ondas se alinea alrededor de los 270° ingresando con una dirección Weste a la Playa El Papagayo. Estos resultados son esperables ya que olas de menor frecuencia sienten el fondo en profundidades mucho mayores que las de alta frecuencia.

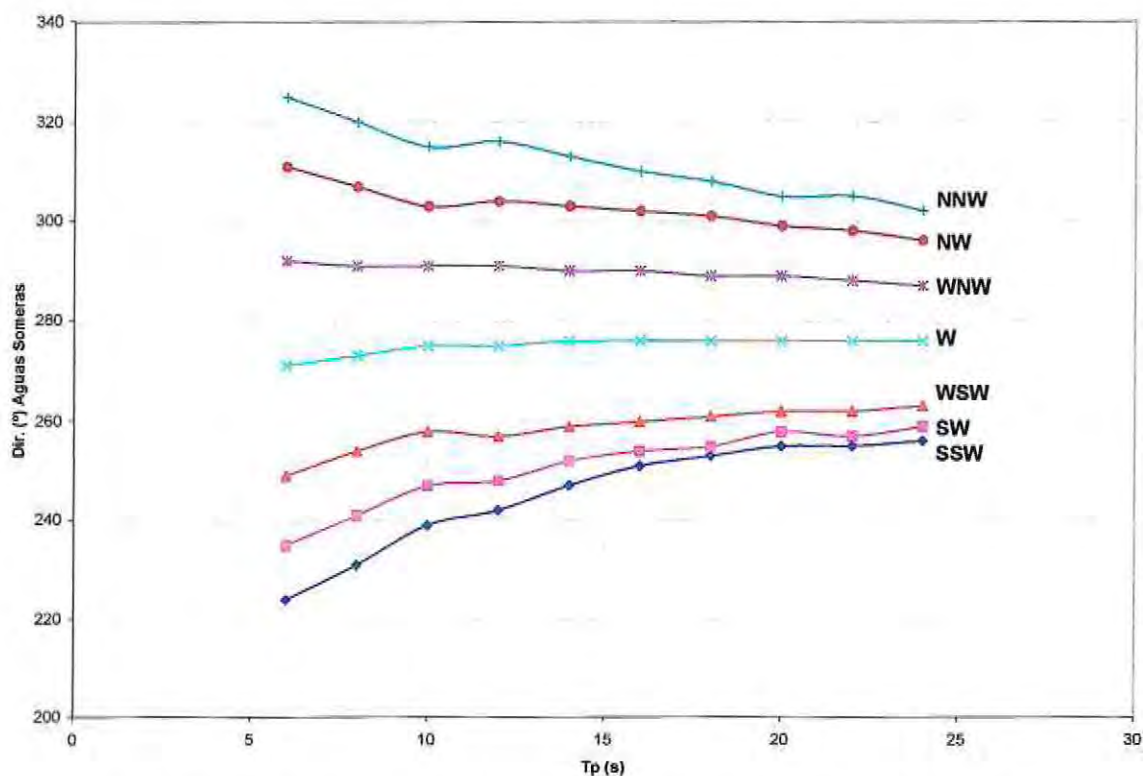


Gráfico 1: Funciones de transferencia de direcciones, para el Nodo 1.
(Fuente: Elaboración Propia).

Por otro lado, las funciones de transferencia en el dominio de las alturas indican que si el periodo aumenta, la amplitud del oleaje en el punto de control se amplifica respecto de las condiciones off shore a medida que las direcciones de incidencia pasan desde el tercer hacia el cuarto cuadrante. Por lo tanto el oleaje incidente desde el tercer cuadrante (Swell del Sur) se ve disminuido en su altura a medida que se aproxima a las costas de la Playa El Papagayo, mientras que el proveniente desde el Swell del Norte se amplifica.

Los resultados de las funciones de transferencia en el dominio de la altura se resumen en el Gráfico 2 y son dependientes de la dirección de incidencia off shore y el periodo peak.

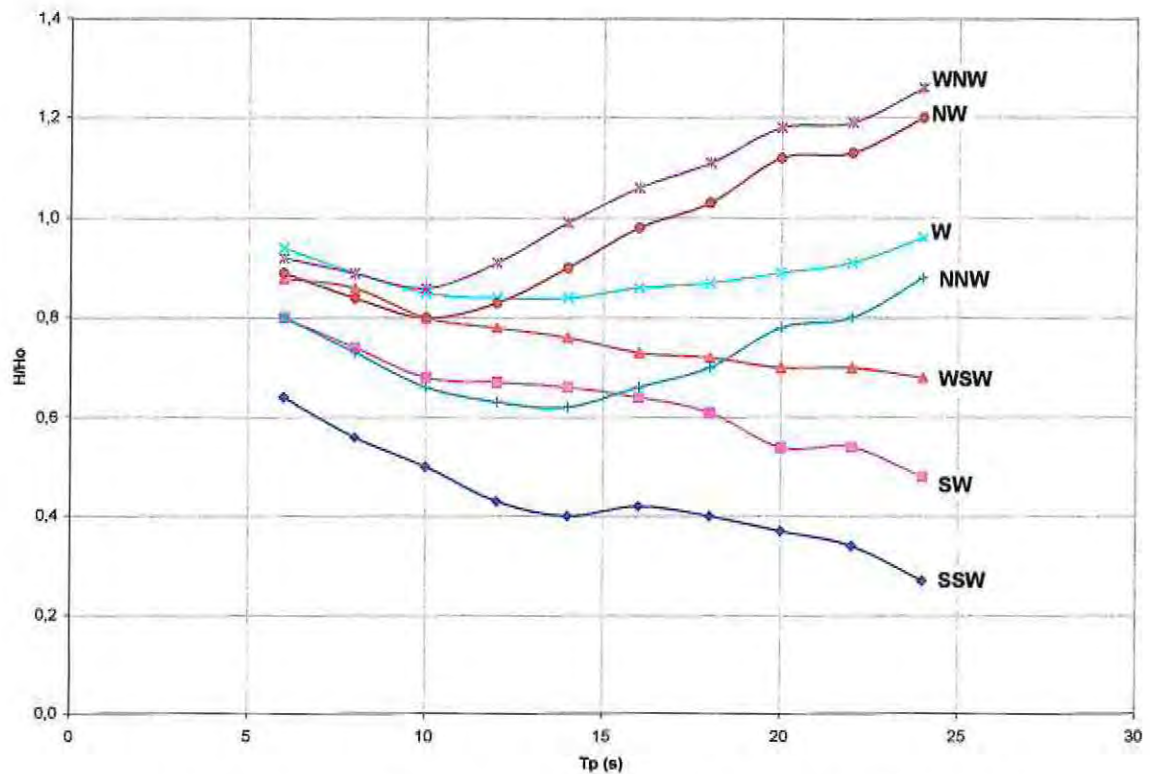


Gráfico 2: Funciones de transferencia de altura de ola, para el Nodo 1.
(Fuente: Elaboración Propia).

(d) *CONDICIONES DE OLEAJE EN PLAYA EL PAPAGAYO*

Con las funciones de transferencia y la base de datos del proyecto Olas Chile se obtuvo la estadística de 20 años para el punto de control (ver la Tabla 9). El registro consiste en la presentación de los parámetros de resumen cada tres horas desde el día 01-01-1985 hasta el 31-12-2004 constituyendo un total de 58192 datos.

En las Tablas 10, 11 y 12 se muestran las tablas de incidencia de altura por periodo, altura por dirección y periodo por dirección, respectivamente, mientras que en las Figuras 27 y 28 se muestran las rosas de oleaje de altura y periodo respectivamente.

Tabla 10: Tabla de incidencia de oleaje de altura y periodo para la Playa El Papagayo.

Wave Distribution By Hight and Period (All Directions)

Location: Playa El Papagayo

Date Range: 01 Jan 1985 12AM to 31 Dec 2004 09PM

Wave Height [m]	Wave Period [s]											Total	C (%)	Maximum Period (s)
	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00			
0,00 - 0,20												100,00		
0,20 - 0,40												100,00		
0,40 - 0,60				0,01	0,04		0,01					0,03	100,00	17,70
0,60 - 0,80			0,04	0,26	0,26	0,15	0,05	0,01				0,78	99,97	19,05
0,80 - 1,00	0,00	0,02	0,18	0,99	1,29	0,57	0,16	0,07	0,01			3,28	99,19	21,69
1,00 - 1,20	0,01	0,07	0,38	2,19	3,16	1,10	0,37	0,08	0,01	0,00		7,37	95,91	23,92
1,20 - 1,40	0,07	0,24	0,67	3,82	5,69	2,20	1,06	0,17	0,05	0,01		13,97	88,54	23,92
1,40 - 1,60	0,06	0,36	0,71	4,32	5,80	2,76	1,40	0,34	0,05	0,01		15,81	74,57	23,92
1,60 - 1,80	0,03	0,40	0,74	4,28	7,60	3,36	1,81	0,42	0,06	0,01		18,71	58,75	21,87
1,80 - 2,00	0,02	0,30	0,51	2,76	6,63	2,75	1,42	0,28	0,07			14,73	40,05	21,81
2,00 - 2,20		0,20	0,44	1,62	4,60	2,31	0,93	0,27	0,05			10,42	25,32	21,68
2,20 - 2,40		0,15	0,30	0,92	3,02	1,62	0,59	0,15	0,02			6,77	14,90	21,76
2,40 - 2,60		0,07	0,18	0,57	1,45	1,10	0,27	0,07	0,01			3,70	8,14	19,50
2,60 - 2,80		0,04	0,14	0,32	0,78	0,50	0,15	0,01				1,93	4,44	19,53
2,80 - 3,00		0,03	0,10	0,17	0,34	0,29	0,06	0,00				0,98	2,50	17,40
3,00 +		0,01	0,16	0,27	0,69	0,35	0,03					1,52	1,52	
Total	0,20	1,88	4,53	22,49	41,32	19,06	8,30	1,85	0,34	0,03		100,00		
C (%)	100,00	99,80	97,92	93,39	70,89	29,58	10,52	2,22	0,36	0,03	0,00			

Meta Data

0,00% Calm Conditions (Wave Height < 0,00 m and Wave Period < 4,00 s)
 Number of Records this selection: 58192
 Total record used in selected interval: 58192
 Including calms):
 Missing data (not included in calculation): 117126
 Wave height: Max: 5.40 Min: 0.52 Mean: 1.73
 Wave period: Max: 23.92 Min: 4.48 Mean: 13.06

Legend

Row and column percentages have the following meanings:
 Total - based on number of records used in selected interval
 C - percent exceedance derived from "Total"
 Frequencies of occurrence are reported in "percentage"

Tabla 11: Tabla de incidencia de oleaje de altura y dirección para la Playa El Papagayo.

Wave Distribution By Height and Direction

Location: Playa El Papagayo

Date Range: 01 Jan 1985 12AM to 31 Dec 2004 09PM

Dirección [°]	Wave Height [m]															Total	C (%)	Maximum Heigth (m)	
	0,00 -	0,20 -	0,40 -	0,60 -	0,80 -	1,00 -	1,20 -	1,40 -	1,60 -	1,80 -	2,00 -	2,20 -	2,40 -	2,60 -	2,80 -				3,00+
200,00																	100,00		
210,00																	100,00		
220,00																	100,00		
230,00																	100,00		
240,00			0,00	0,14	0,42	0,82	0,93	0,76	0,69	0,34	0,14	0,04	0,01				4,29	100,00	2,53
250,00			0,01	0,35	1,30	3,35	6,98	8,14	10,25	8,01	5,41	3,13	1,57	0,56	0,22	0,14	49,42	95,71	3,43
260,00			0,01	0,21	0,99	2,09	3,96	4,69	5,37	4,52	3,34	2,39	1,26	0,65	0,38	0,48	30,33	46,29	4,02
270,00			0,01	0,04	0,35	0,66	1,36	1,38	1,53	1,19	0,91	0,69	0,39	0,32	0,14	0,38	9,34	15,96	5,31
280,00				0,02	0,17	0,31	0,48	0,49	0,51	0,36	0,34	0,28	0,25	0,17	0,08	0,21	3,68	6,61	5,40
290,00				0,01	0,05	0,10	0,16	0,19	0,17	0,16	0,14	0,12	0,12	0,12	0,09	0,16	1,58	2,94	4,71
300,00				0,00	0,01	0,03	0,09	0,12	0,14	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,10	0,96	1,35	4,47
310,00				0,01	0,00	0,01	0,01	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,37	0,40	3,90
320,00								0,00	0,00	0,01	0,01	0,10	0,00				0,02	0,02	2,41
330,00																			
340,00																			
350,00																			
Total			0,03	0,78	3,28	7,37	13,97	15,81	18,71	14,73	10,42	6,77	3,70	1,93	0,98	1,52	100,00		
C (%)	100,00	100,00	100,00	99,97	99,19	95,91	88,54	74,57	58,75	40,05	25,32	14,90	8,14	4,43	2,50	1,52			

Meta Data

0,00% Calm Conditions (Wave Height < 0,00 m and Wave Period < 4,00 s)
 Number of Records this selection: 58192
 Total record used in selected interval (including calms): 58192
 Missing data (not included in calculation): 117126
 Wave height: Max: 5.40 Min: 0.52 Mean: 1.73

Legend

Row and column percentages have the following meanings:
 Total - based on number of records used in selected interval
 C - percent exceedance derived from "Total"
 Frequencies of occurrence are reported in "percentage"

Tabla 12: Tabla de incidencia de oleaje de periodo y dirección para la Playa El Papagayo.

Wave Distribution By Period and Direction

Location: Playa El Papagayo

Date Range: 01 Jan 1985 12AM to 31 Dec 2004 09PM

Dirección [°]	Period [m]											Total	C (%)	Maximum Period (s)	
	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	22,00				24,00+
200,00														100,00	
210,00														100,00	
220,00														100,00	
230,00														100,00	
240,00		0,02	0,63	0,45	1,94	1,84	0,26	0,03					5,19	100,00	17,81
250,00		0,03	0,66	2,24	13,43	7,88	11,46	2,70	0,42	0,08	0,01		38,92	94,81	23,92
260,00			0,05	0,82	7,25	14,55	8,18	4,57	0,98	0,22	0,01		36,62	55,89	23,92
270,00			0,04	0,65	2,65	3,11	2,15	1,95	0,64	0,07	0,02		11,28	19,27	23,92
280,00		0,01	0,07	0,51	1,16	1,11	0,73	0,63	0,18	0,04			4,44	6,61	21,98
290,00		0,04	0,22	0,37	0,53	0,46	0,15	0,12	0,02				1,91	2,94	19,74
300,00		0,11	0,36	0,27	0,17	0,16	0,06	0,02	0,00				1,16	1,35	19,79
310,00		0,03	0,23	0,14	0,02	0,02	0,01	0,00					0,45	0,40	17,73
320,00		0,00	0,01	0,01									0,03	0,02	8,98
330,00															
340,00															
350,00															
360,00															
Total		0,24	2,27	5,47	27,16	29,14	23,01	10,02	2,24	0,41	0,03	0,00	100,00		
C (%)	100	99,76	97,49	92,02	64,85	35,71	12,70	2,68	0,44	0,03	0,00	0,00			

Meta Data

0,00% Calm Conditions (Wave Height < 0,00 m and Wave Period < 0,00 s)
 Number of Records this selection: 58192
 Total record used in selected interval: 58192
 (Including calms):
 Missing data (not included in calculation): 248
 Wave period (all data): Max: 23.92 Min: 4.82 Mean: 13.06
 Wave period (scatter only): Max: 23.92 Min: 4.82 Mean: 13.06

Legend

Row and column percentages have the following meanings:
 Total - based on number of records used in selected interval
 C - percent exceedance derived from "Total"
 Frequencies of occurrence are reported in "percentage"

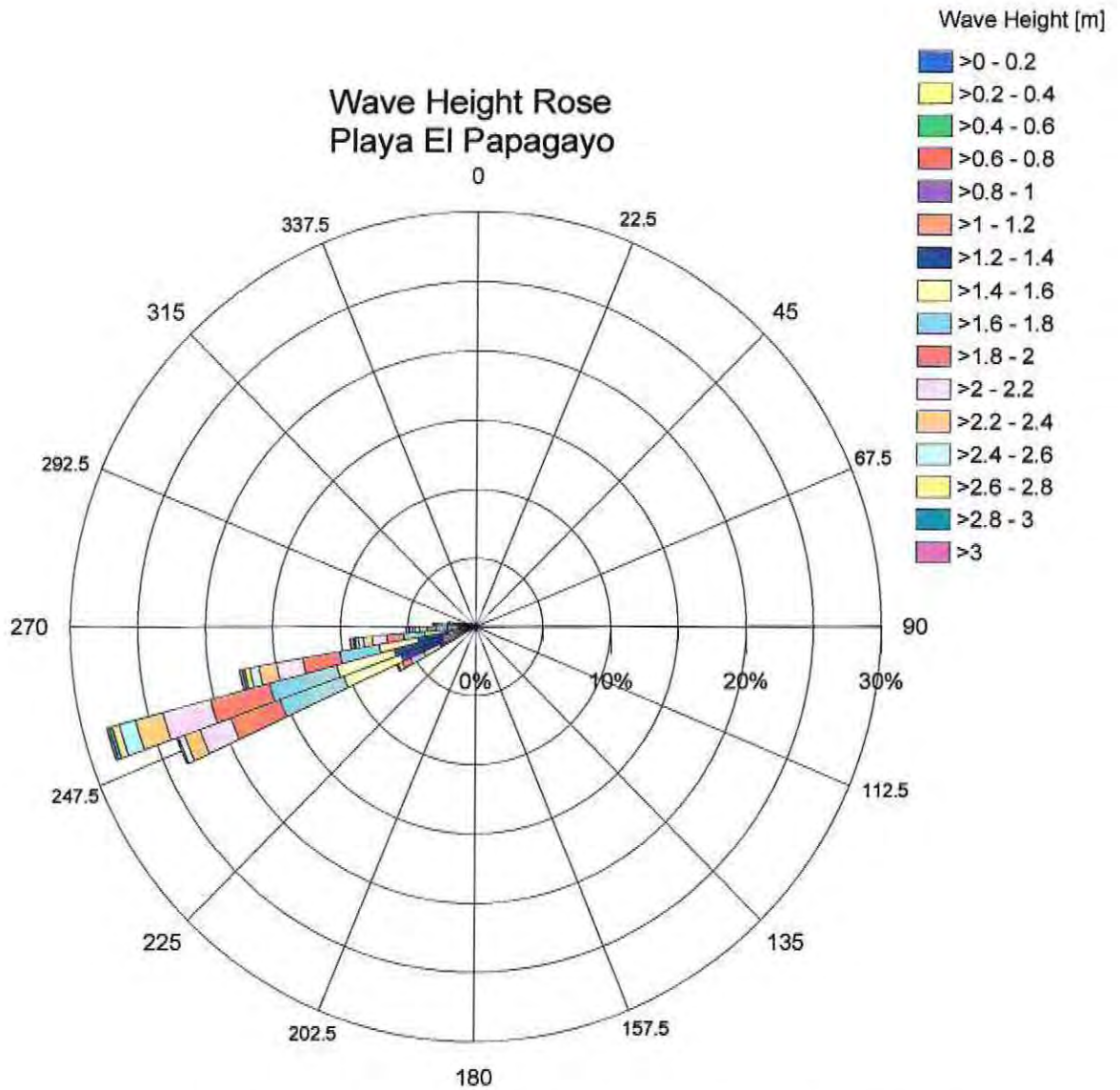


Figura 27: Rosa de altura de oleaje para la Playa El Papagayo.

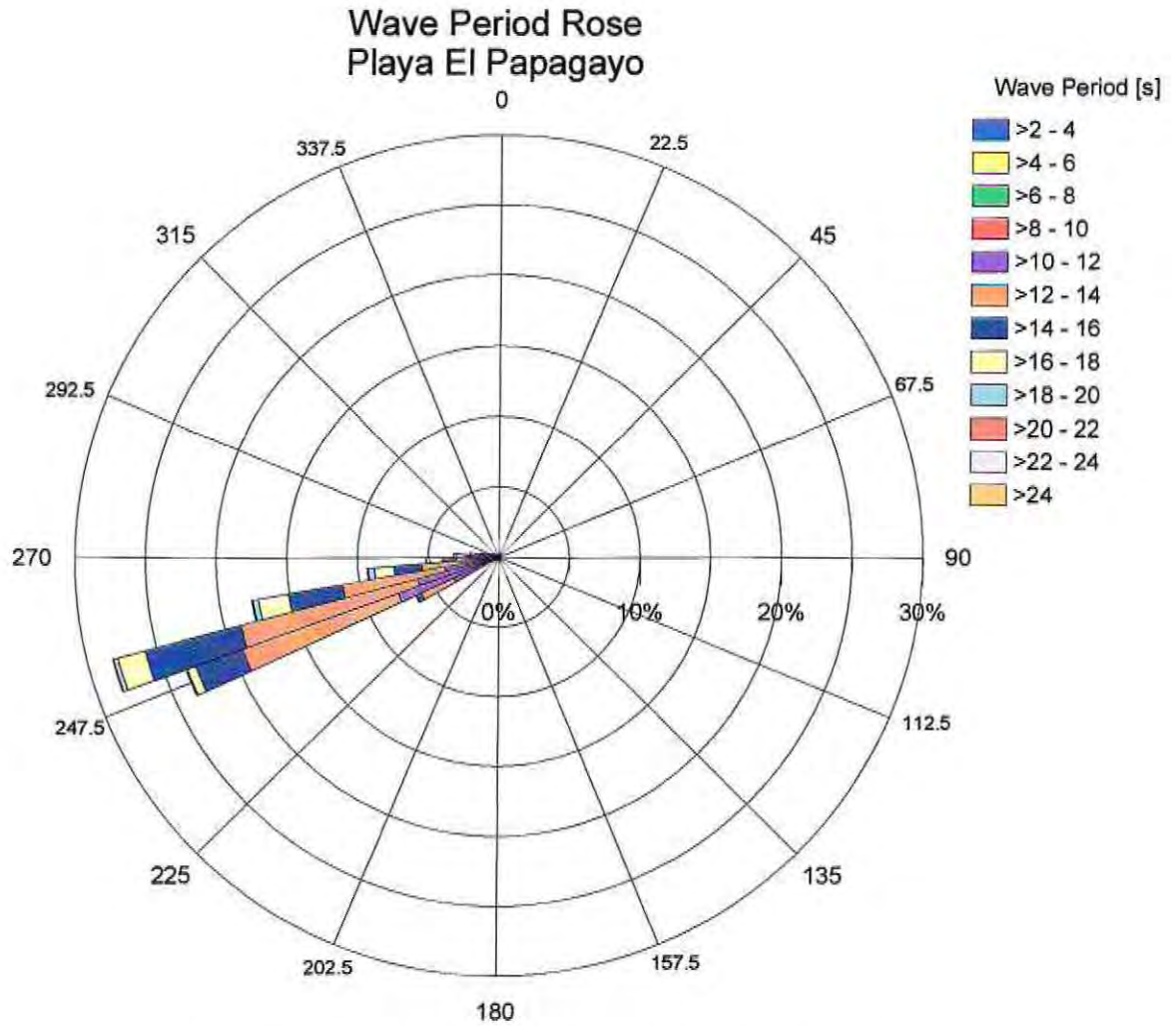


Figura 28: Rosa de periodo de oleaje para la Playa El Papagayo.

En los Gráficos 3, 4 y 5 se presentan las tablas de incidencia para analizar las frecuencias de oleaje presentes durante 20 años en Playa El Papagayo.

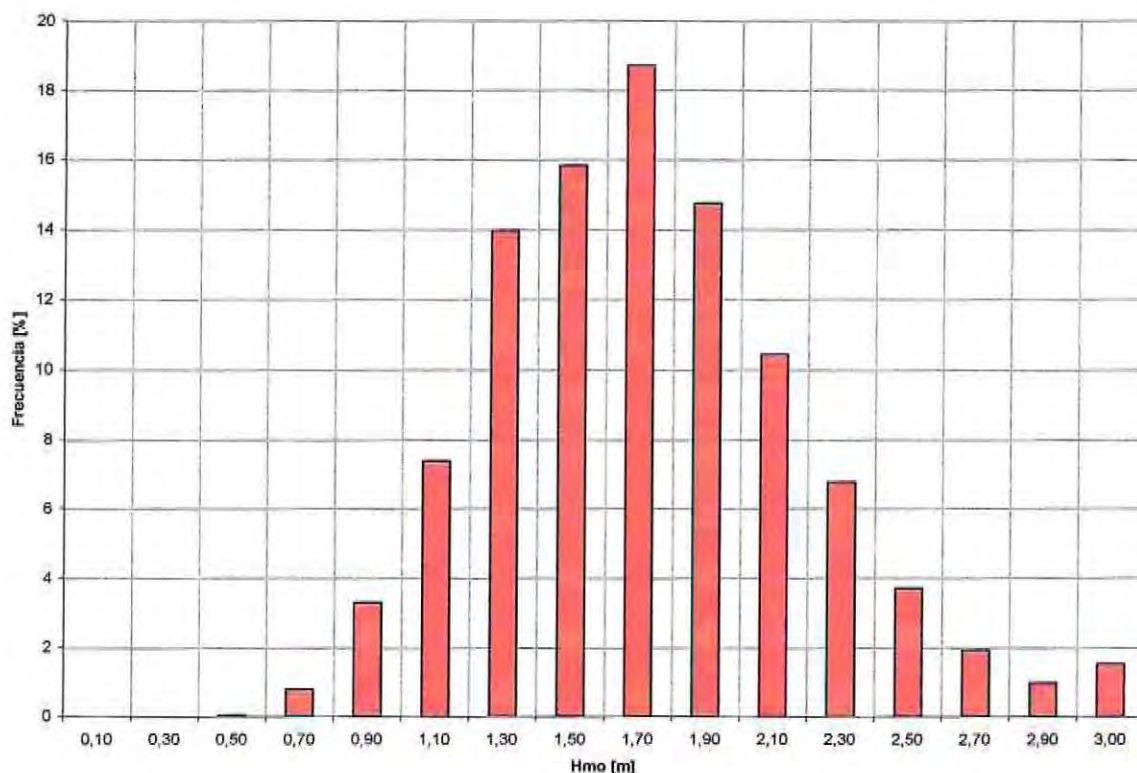


Gráfico 3: Frecuencia de aparición versus la altura de ola espectral.

(Fuente: Elaboración Propia).

Del análisis de las tablas de incidencia y el Gráfico 3 se observa que la altura de ola más frecuente en la Playa El Papagayo está en el intervalo de los 1,6 a los 1,8 metros, siendo 1,7 su marca de clase y al 18,71% de los casos encontrados, seguida por aquellas olas de alturas iguales a 1,5 y 1,9 metros con frecuencias de aparición de 13,97% y 14,74% respectivamente.

Durante los 20 años de estadísticas analizadas, el 73,64% de las olas tienen sus alturas entre los 1,2 y 2,2 metros, siendo las demás alturas constituyentes del 26,26% de las ocurrencias.

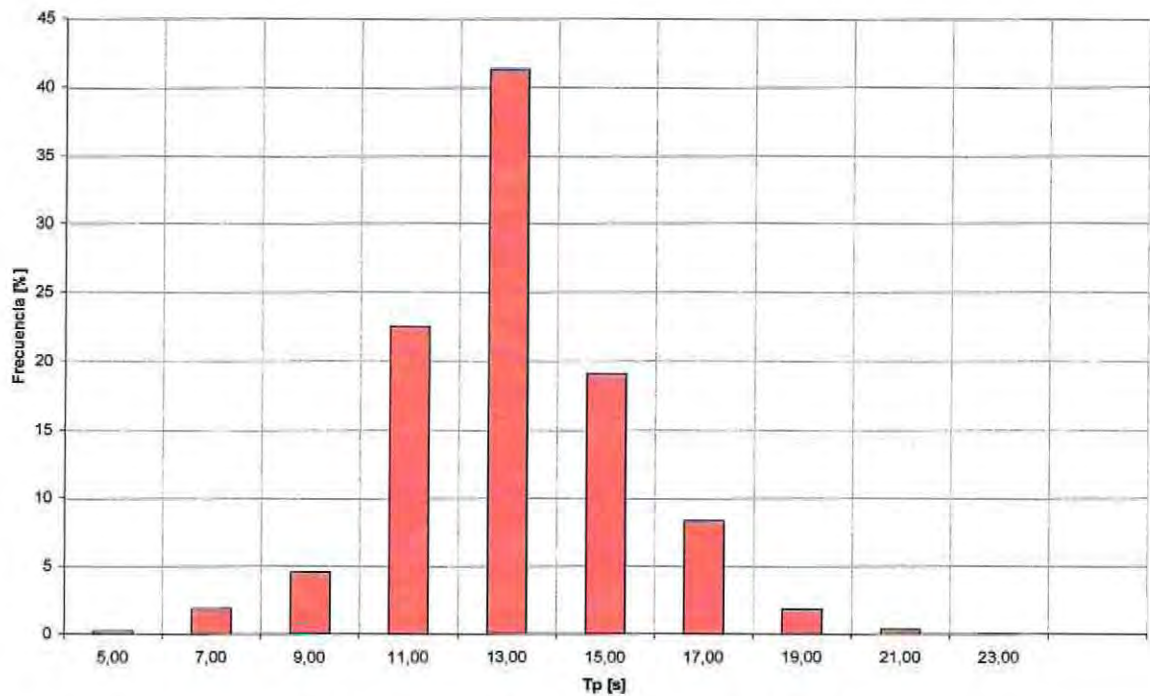


Gráfico 4: Frecuencia de aparición versus el periodo peak.
(Fuente: Elaboración Propia).

Del análisis del Gráfico 4 se advierte que el periodo más frecuente es 13 segundos (como marca de clase) constituyendo el 41,32% de los periodos observados.

El 82,87% de las olas registradas en 20 años tienen un periodo contenido en el intervalo de los 10 a los 16 segundos. Esto correspondería a un oleaje tipo Swell clásico de las bahías abiertas hacia el 4º cuadrante⁹.

⁹ La clasificación se ha hecho sobre la base de lo mencionado en la Publicación 3201 del SHOA, 3ª edición 2005.

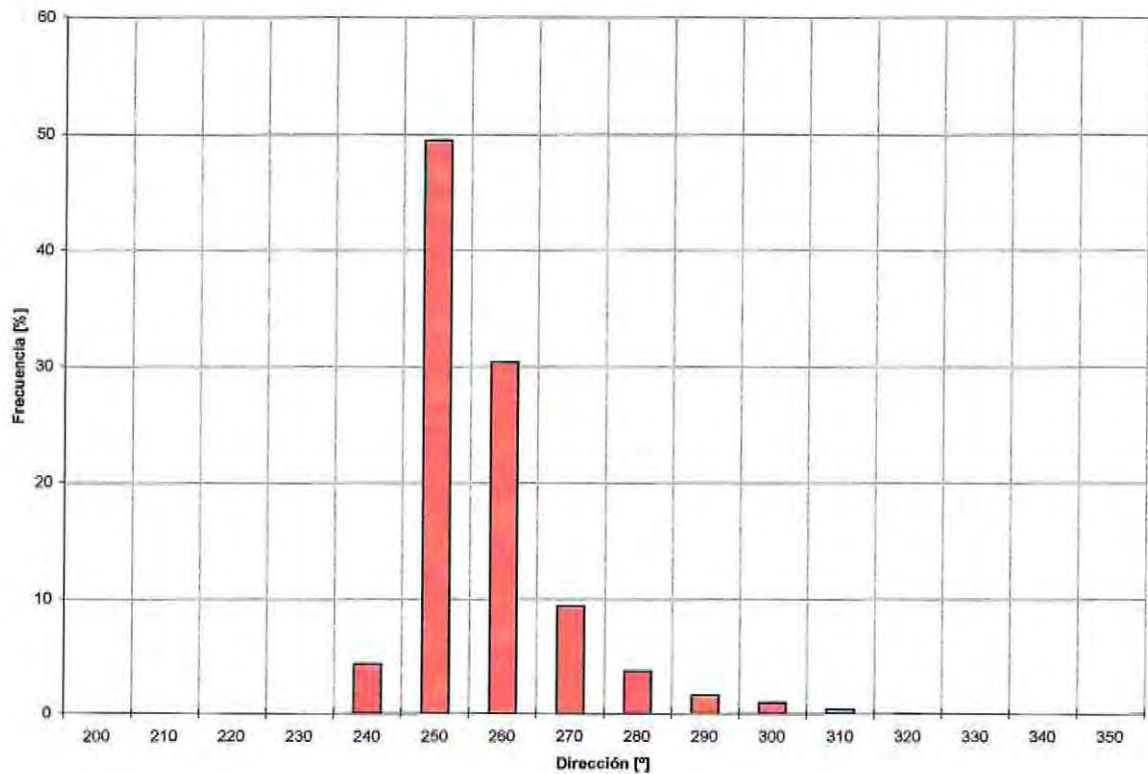


Gráfico 5: Frecuencia de aparición versus la dirección media de incidencia.
(Fuente: Elaboración Propia).

Claramente el oleaje proviene mayoritariamente desde el 3º cuadrante de direcciones con 250º como dirección más frecuente, la cual corresponde al 49,42% de las olas observadas en 20 años.

Las olas provenientes desde el 3º cuadrante constituyen el 93,98% del total, mientras que las del 4º cuadrante alcanzan el 6,62% de los casos.

Finalmente se presentan las curvas de excedencia para altura y periodo, en los gráficos 6 y 7 respectivamente.

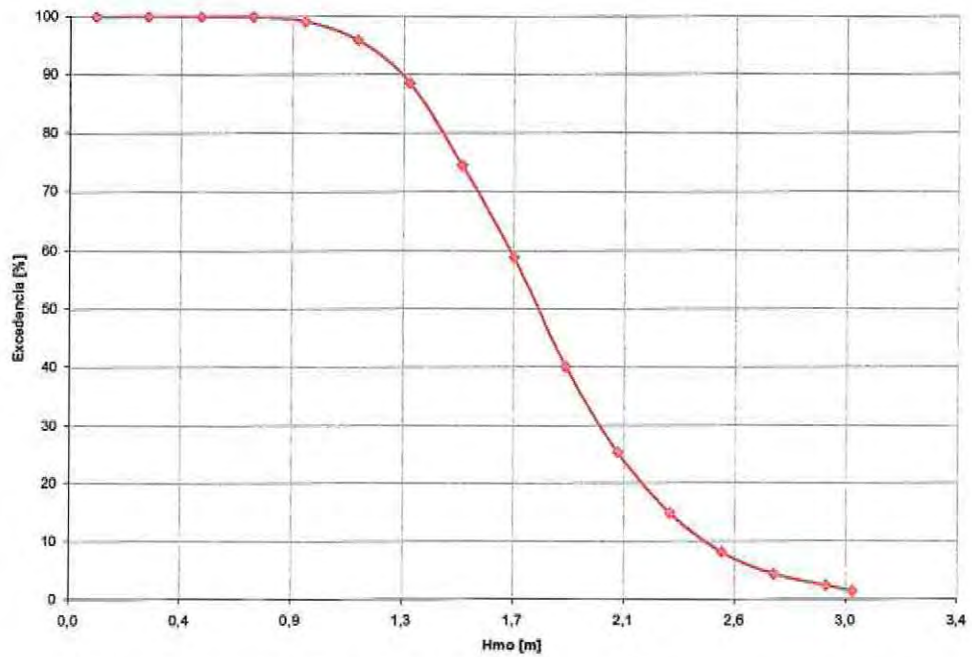


Gráfico 6: Porcentaje de excedencia versus altura de ola espectral.
(Fuente: Elaboración Propia).

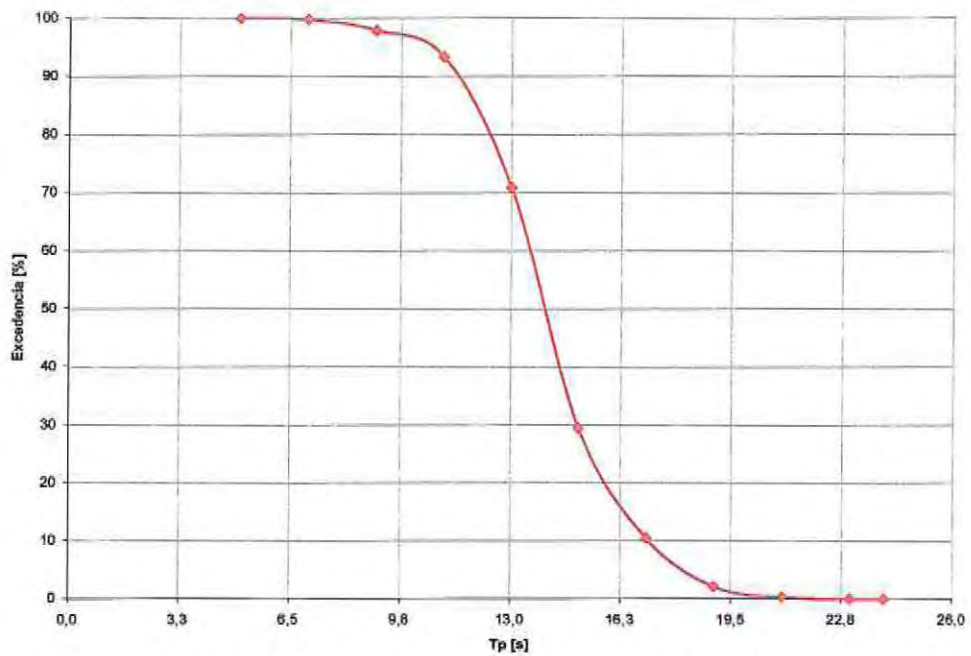


Gráfico 7: Porcentaje de excedencia versus periodo peak.
(Fuente: Elaboración Propia).

4.2 MAREAS

4.2.1 COMPONENTE ASTRONÓMICA

La Bahía de Quintero corresponde a un Puerto Secundario, de acuerdo a las indicaciones de la tabla de Mareas del SHOA, siendo su patrón el Puerto de Valparaíso. Considerando que la Playa El Papagayo está en el sector Nor-Oeste de la Península de los Molles, se considera válido asumir que también tiene su puerto patrón en Valparaíso.

El régimen de mareas de la Bahía de Quintero, al igual que en las costas abiertas del litoral central, son de características semidiurnas con desigualdad diurna. Es decir, a diario se presentan dos pleamares y dos bajamares con distintas amplitudes. En este tipo de mareas predomina la acción Lunar, por lo que el periodo característico de la oscilación es de 12.42 horas.

De manera de verificar el comportamiento de las mareas a los largo del tiempo, se consideran las tablas de Valparaíso para los años 2003 al 2005, efectuando las correcciones para trasladar dichos pronósticos hasta la Bahía de Quintero y determinando los planos mareales obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 13: Planos mareales para Quintero según pronósticos desde 2003 a 2005.
(Fuente: Elaboración Propia).

Plano Mareal	Cota [m NRS]
Marea Alta Extrema	+ 2,02
Nivel Medio del Mar	+ 0,95
Bajamar Media	+ 0,44
Marea Más Baja	+ 0,13
Nivel de Reducción de Sondas	+ 0,00

El SHOA establece que para Quintero la amplitud máxima de marea es de 1,66¹⁰ metros. Por lo tanto, para lo efectos que se enmarcan en el desarrollo del presente proyecto de título se considerará dicha amplitud como válida.

4.2.2 COMPONENTE METEOROLÓGICA

La marea astronómica en ocasiones se ve alterada por efectos meteorológicos propios de la zona de estudio, siendo relevantes las acciones del viento (wind setup) y variación de la presión atmosférica.

Para la determinación de los efectos de presión se utilizan tablas de corrección del SHOA (ver Tabla 14), mientras que para el wind setup se desarrollan estudios de vientos, determinación de largos de Fetch y cálculo de otros parámetros que no son motivo de desarrollo para el presente proyecto de título.

¹⁰ Nótese que la diferencia existente entre la amplitud de marea y la marea alta extrema se deben a que una se mide desde bajamar y la otra desde el NRS, respectivamente.

Tabla 14: Corrección por presión atmosférica.

(Fuente: Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, SHOA).

Presión Atmosférica		Corrección (m)
En milímetros	En milibares	
722	963	+0,50
726	968	+0,45
730	973	+0,40
734	978	+0,35
738	983	+0,30
741	988	+0,25
745	993	+0,20
749	998	+0,15
752	1003	+0,10
756	1008	+0,05
760	1013	0,00
764	1018	-0,05
768	1023	-0,10
771	1028	-0,15
775	1033	-0,20
779	1038	-0,25

Magnitudes características de estos efectos para la Bahía de Valparaíso citadas en estudios realizados¹¹, son del orden de los 20 y 10 centímetros para presión y viento respectivamente. Por lo tanto estos valores serán considerados como válidos para el diseño de estabilidad de los elementos de retención de arena en la zona de Playa El Papagayo, Quintero.

Para efectos de este estudio se descartan los potenciales efectos de la marea meteorológica en el comportamiento morfodinámico de la playa, debido a la escala temporal de los fenómenos involucrados en el análisis.

¹¹ "Alternativas de Re-localización para pescadores del sector costanera de Puerto Valparaíso", desarrollado por la Universidad de Valparaíso, carrera de Ingeniería Civil Oceánica.

4.3 GRANULOMETRÍA

4.3.1 CAMPAÑA DE 1989¹²

En Diciembre de 1989 se realizó una campaña de medición de parámetros característicos de suelo tomando muestras de cerro y playa, en el sector del Papagayo. En este muestreo se llevaron a cabo diversos ensayos, dentro de los cuales destacan:

- Ensaye Triaxial
- Cono Dinámico de Penetración.
- Clasificación.
- Humedad.

Las muestras de playa que se obtuvieron se rotularon como M1 y M2, y fueron tomadas a 50 y 65 centímetros de profundidad en una misma calicata, respectivamente y se desconocen las coordenadas exactas de la extracción de muestras de playa. No obstante, se asume que el sector del cual se obtuvieron es en las cercanías del Hotel Yachting Club, ya que todos los estudios realizados en el cerro hacen referencia a esta localización.

Los resultados de los ensayos granulométricos realizados para M1 y M2 se resumen en la Tabla 15. En el Gráfico 8 se muestran las curvas granulométricas de las muestras.

Tabla 15: Resumen de análisis granulométrico para cada muestra.

(Fuente: Ref. 8).

Tamiz	Abertura Malla [mm]	% Pasante de M1	% Pasante de M2
Nº 4	4,75	100	100
Nº 10	2,00	99,6	98,8
Nº 20	0,85	94,3	83,8
Nº 40	0,50	73,8	40,7
Nº 60	0,25	16,6	12,6
Nº 200	0,08	1,4	1,1

¹² A cargo del laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Técnica Federico Santa María (LEMCO), solicitado por la Ilustre Municipalidad de Quintero debido a los problemas presentes en Playa El Papagayo.

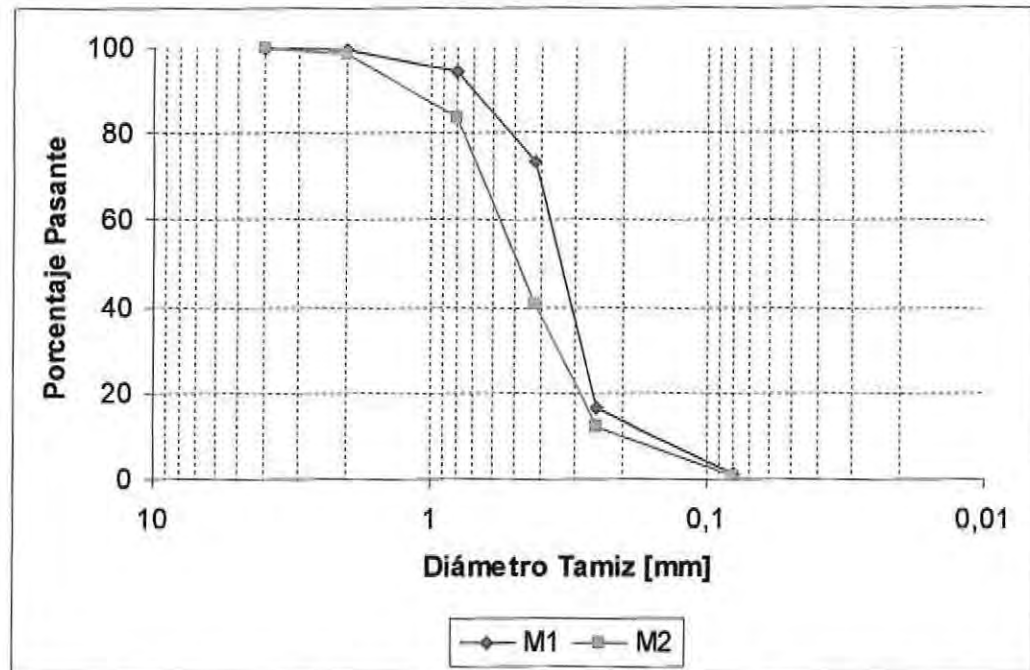


Gráfico 8: Comparación de curvas granulométricas para ambas muestras de sedimento.
(Fuente: Elaboración Propia).

Ambas muestras fueron clasificadas como SP, con diámetro medio del sedimento (D_{50}) de 0,35 y 0,50 milímetros, respectivamente. Comparando estas dos muestras se advierte que el grano aumenta en diámetro a medida que avanza en la profundidad de muestreo. Esto se debe principalmente a que el sedimento superficial está expuesto a una mayor degradación y meteorización ya que éste recibe de manera directa la acción de oleaje presente en la zona.

4.3.2 CAMPAÑA DE 2006¹³

En Enero de 2006 se llevó a cabo una campaña de muestreo con la finalidad de determinar las propiedades granulométricas de los sedimentos presentes en la zona de estudio y cuyos detalles se muestran en el Anexo I: Resultados de la Granulometría. Los perfiles estudiados se muestran en la Figura 29.

(a) RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan de manera resumida los resultados de los ensayos de laboratorio para cada una de las muestras, mostrando el diámetro medio (D_{50}) y la velocidad de sedimentación (ω):

¹³ A cargo del Profesor de la Asignatura de Geología Costera Señor Hernán Vergara Cortés y asistido por quien suscribe.

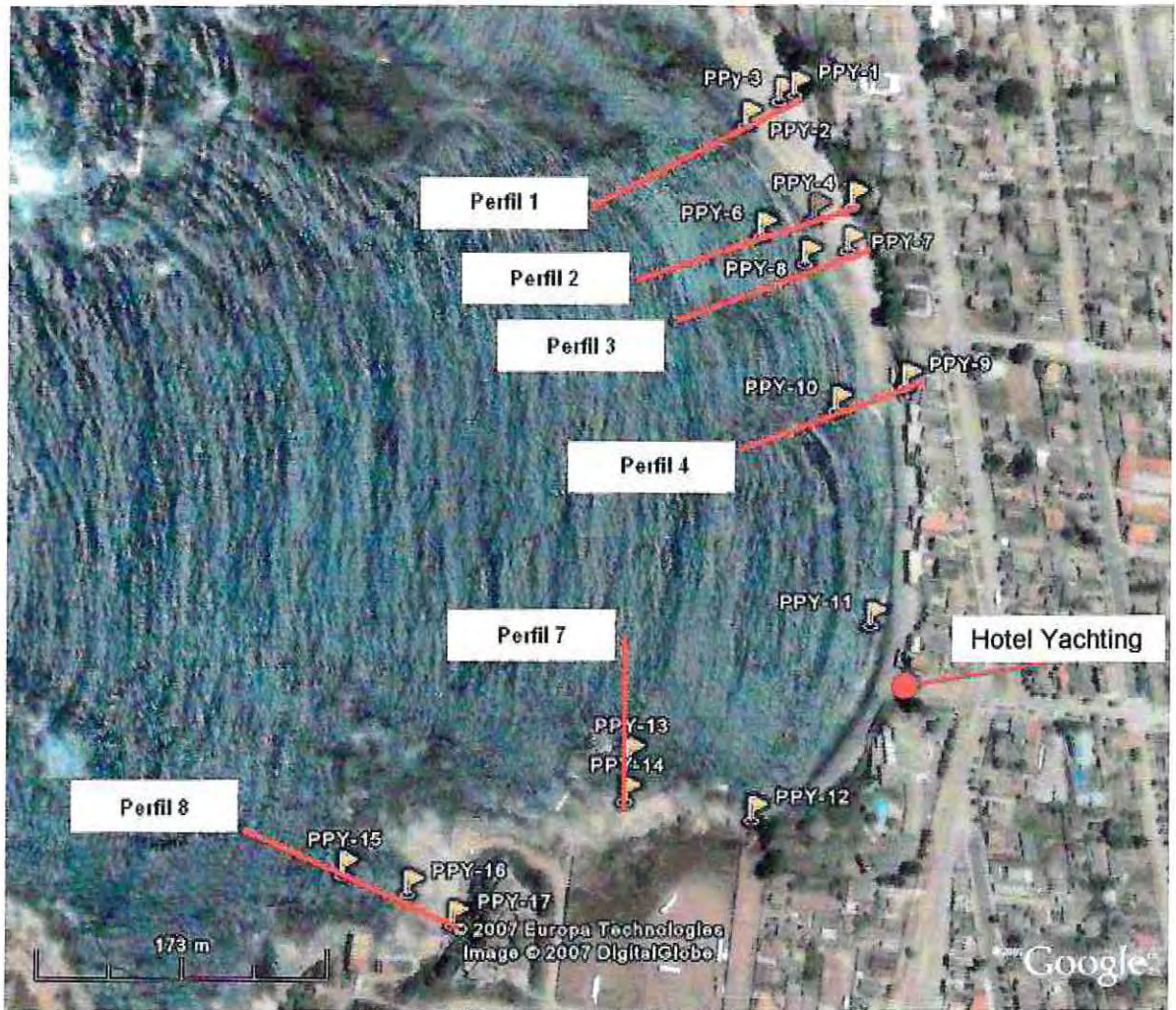


Figura 29: Ubicación de los perfiles.
(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 16: Resultados ensayos de laboratorio.
(Fuente: Elaboración Propia).

Muestra	D ₅₀ [mm]	ω [m/s]	Clasificación
PPY – 01	1.687	0.179	SW
PPY – 02	6.061	0.339	GP
PPY – 03	2.865	0.233	SP
PPY – 04	1.514	0.170	SW
PPY – 05	0.561	0.072	SP
PPY – 06	0.384	0.048	SP
PPY – 07	0.589	0.076	SP
PPY – 08	0.639	0.084	SP
PPY – 09	0.607	0.079	SP
PPY – 10	0.392	0.049	SP
PPY – 11	0.975	0.133	SP
PPY – 12	1.350	0.160	SP
PPY – 13	3.000	0.239	SP
PPY – 14	0.454	0.057	SP
PPY – 15	1.987	0.194	SP
PPY – 16	0.472	0.06	SP
PPY – 17	0.423	0.053	SP

En general, predomina el tipo de arena SP (arenas mal graduadas), con una variación significativa del tamaño medio del grano.

(b) VARIACIÓN ESPACIAL DEL TAMAÑO DEL GRANO

Considerando el muestreo realizado y despreciando el perfil 5 y 6, ya que han sido caracterizados mediante la toma de una muestra por cada estación, se realizó un análisis de la variación espacial del tamaño del sedimento.

De acuerdo a la ubicación geográfica de cada una de las muestras sobre la línea del perfil (ver Figura 29) y considerando el diámetro medio se obtuvieron los resultados mostrados en el Gráfico 9.

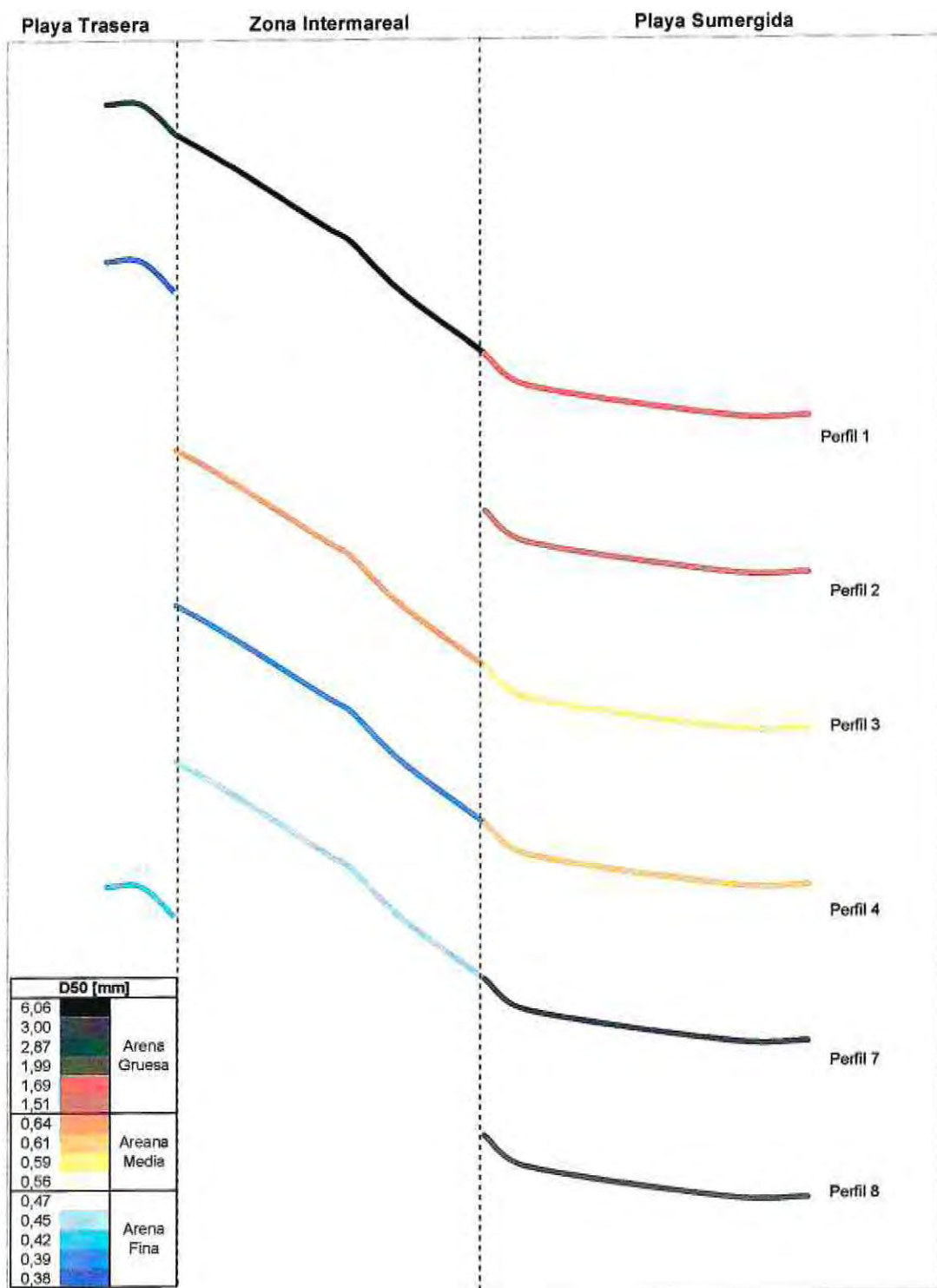


Gráfico 9: Análisis longitudinal del tamaño medio del grano.
(Fuente: Elaboración Propia).

Al analizar el Gráfico 9 se puede apreciar una gran variabilidad del tamaño medio del grano. Nótese que para el perfil 1 y 3, el mayor tamaño del grano medio se encuentra en la zona intermareal, mientras que en los restantes perfiles el de tamaño mayor del sedimento superficial en la zona sumergida, seguido la zona intermareal y finalmente la playa trasera. Si bien la tendencia no es pura, se encuentran similares condiciones en 4 de los 6 perfiles estudiados, la cual indica un aumento del tamaño del grano a medida que se acerca a la orilla del mar.

Con las curvas granulométricas de cada una de las muestras componentes de los perfiles estudiados, se determinó la arena equivalente en cada una de las zonas muestreadas y con esta información se ha desarrollado una curva granulométrica representativa de toda la Playa El Papagayo. Los resultados obtenidos para este análisis se presentan en el Gráfico 10 y Tabla 17.

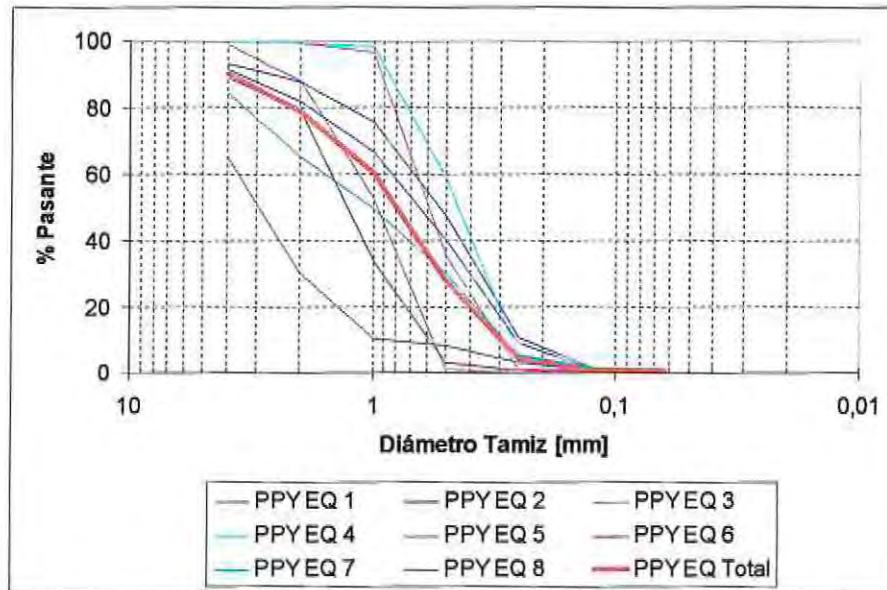


Gráfico 10: Curva granulométrica equivalente para todos los perfiles.
(Fuente: Elaboración Propia).

Tabla 17: Diámetros utilizados para la descripción de muestras de sedimento.
(Fuente: Elaboración Propia).

Diámetros Relevantes PPY EQ Total		
D_{60}	0,992	mm
D_{50}	0,837	mm
D_{30}	0,527	mm
D_{10}	0,306	mm

4.3.3 COMPARACIÓN DE AMBAS CAMPAÑAS

De acuerdo a los supuestos considerados para las muestras M1 y M2, éstas serían compatibles en posición con la muestra PPY - 11. Todas las muestras (M1, M2 y PPY -11) corresponden a una Arena Mal Graduada (SP), pero se advierte una diferencia en el tamaño del grano. En el Gráfico 11 se aprecia un aumento en el tamaño del grano presente en la zona muestreada, considerando que

la primera campaña realizada en 1989 indica un aumento del diámetro medio con la profundidad, se puede asumir que ha existido una constante erosión del sedimento superficial producto de la acción del oleaje en la zona. Provocando de esta manera un descenso paulatino de la playa, estando en la actualidad las capas de sedimento inferior de 1989, en la zona superior de la playa en el 2006.

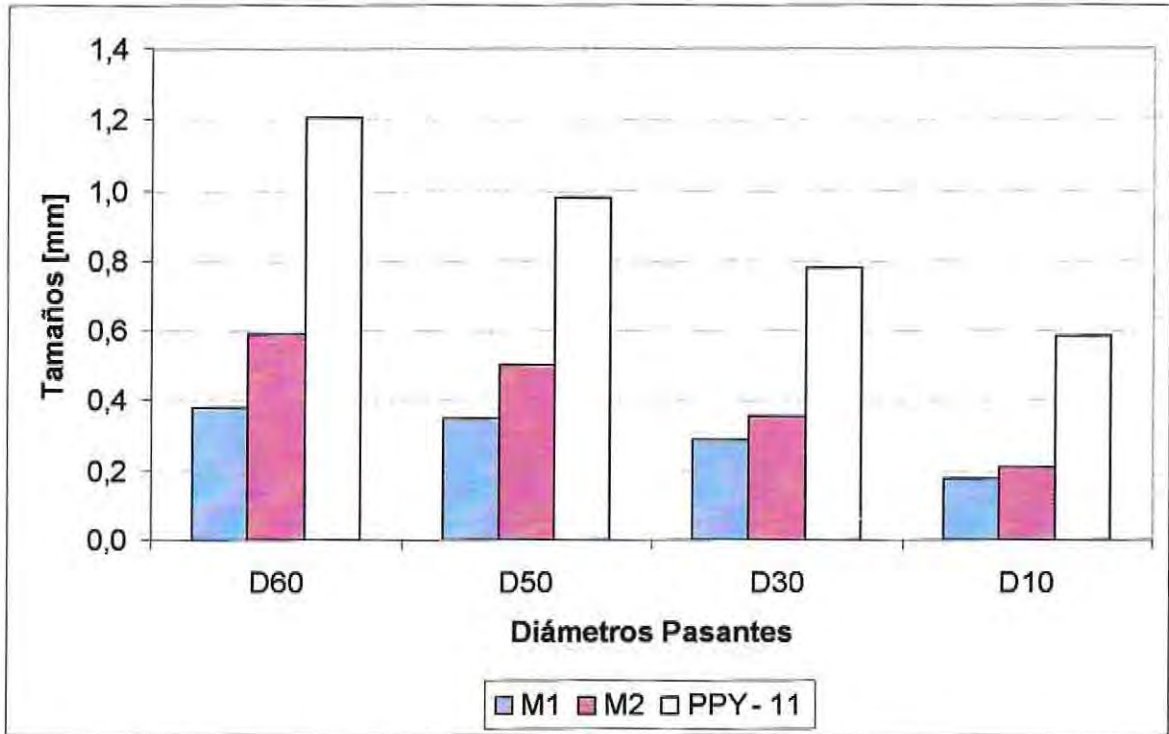


Gráfico 11: Comparación de tamaños característicos del sedimento.
(Fuente: Elaboración Propia).

4.4 EXPLORACIÓN DEL FONDO MARINO

4.4.1 GENERALIDADES

En Noviembre de 2006 en el marco de este estudio, se llevó a cabo un buceo exploratorio de la playa el Papagayo, con la finalidad de caracterizar el estado del fondo marino. Este buceo constó de 4 líneas de sondeos, las cuales se ilustran en la Figura 30. Las rutas 1, 2, 3 y 4 de sondeos abarcan una línea de aproximadamente 338, 160, 350 y 338 metros respectivamente.

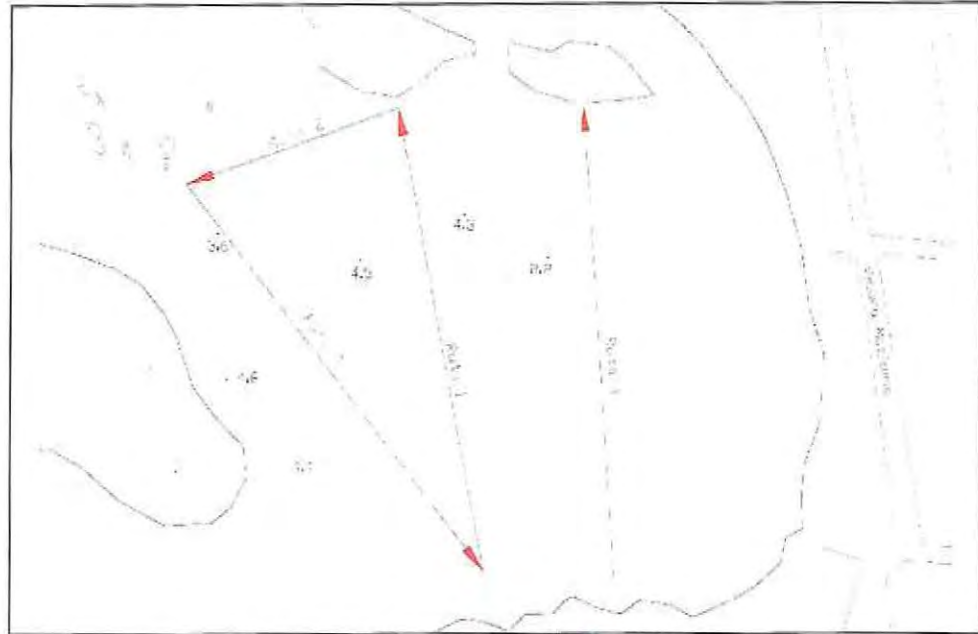
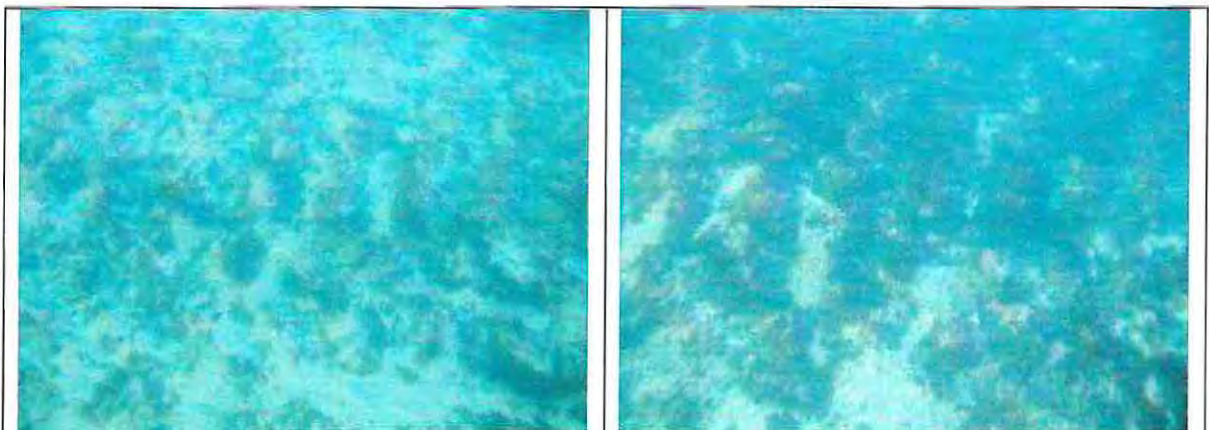


Figura 30: Líneas de sondeo submarino.
(Fuente: Elaboración Propia).

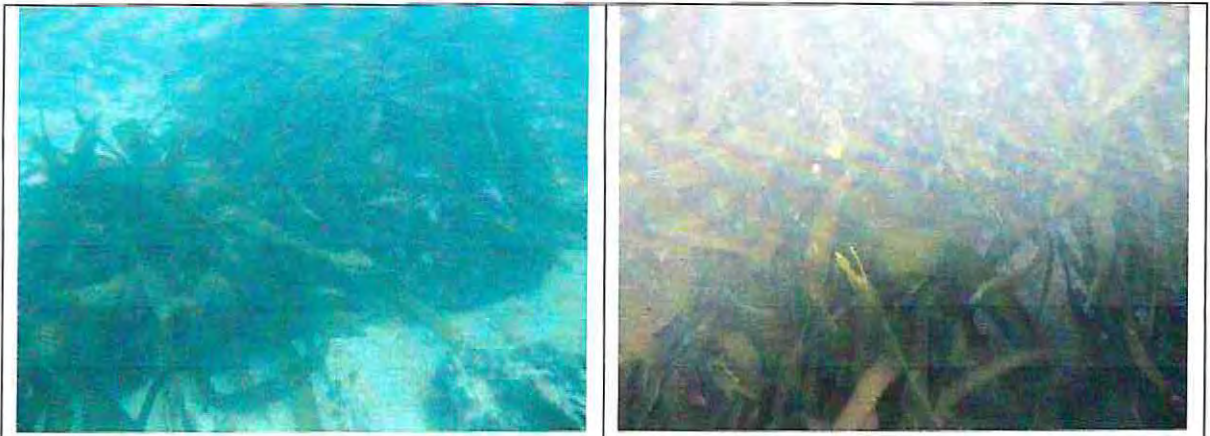
4.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS

(a) RUTA 1

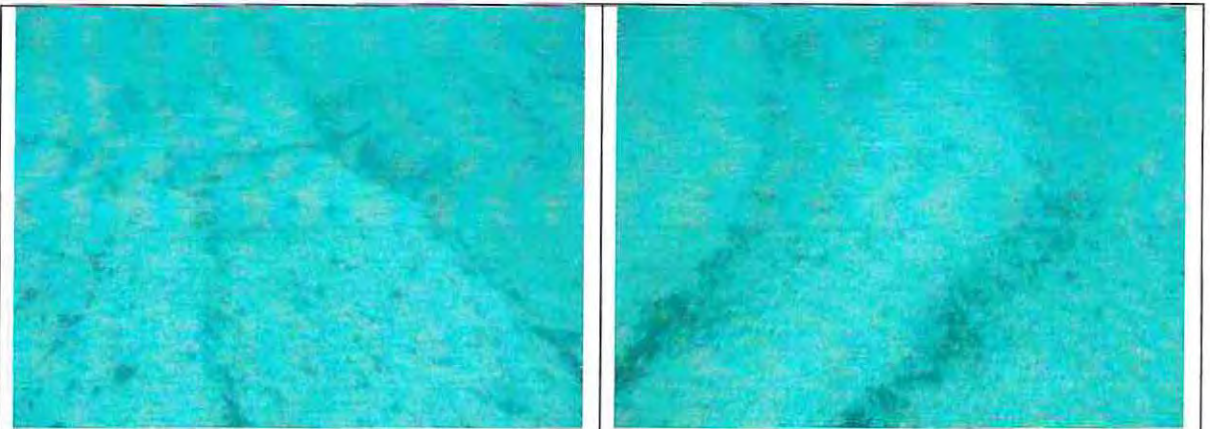
Se detecta un predominio de formaciones rocosas cubiertas de pelillo y pequeñas zonas (sobre las rocas) de depositación de sedimentos. En algunos lugares hay presencia de comunidades algales del tipo *Macrocystis sp.* y se detectan formaciones simétricas de ripples, lo cual es característico de las zonas costeras influenciadas preferentemente por la acción del oleaje.



Set Fotográfico Ruta 1, Rocas cubiertas de pelillo.



Set Fotográfico Ruta 1, Comunidades algales.



Set Fotográfico Ruta 1, Ripples.

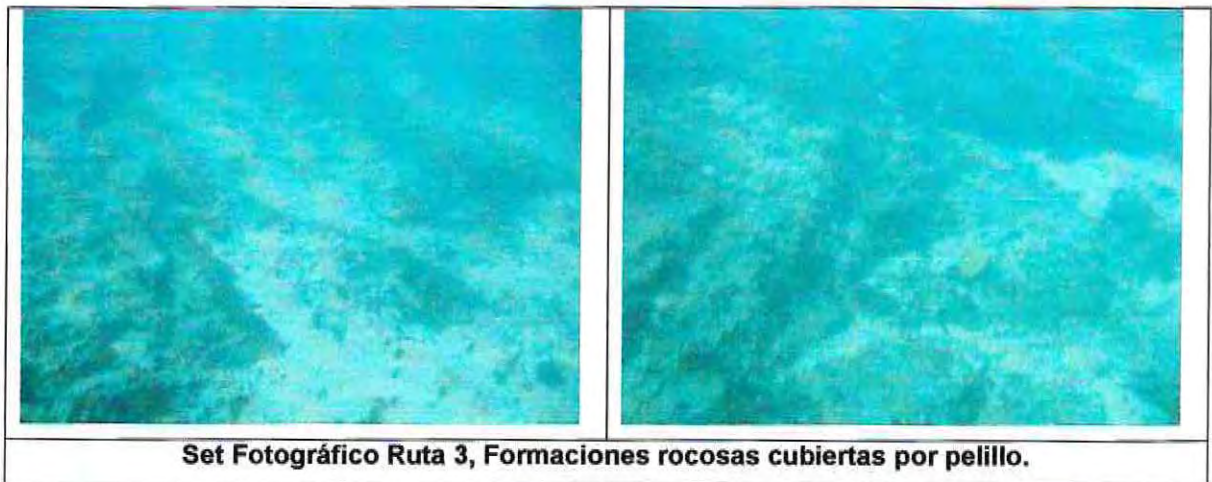
(b) RUTA 2

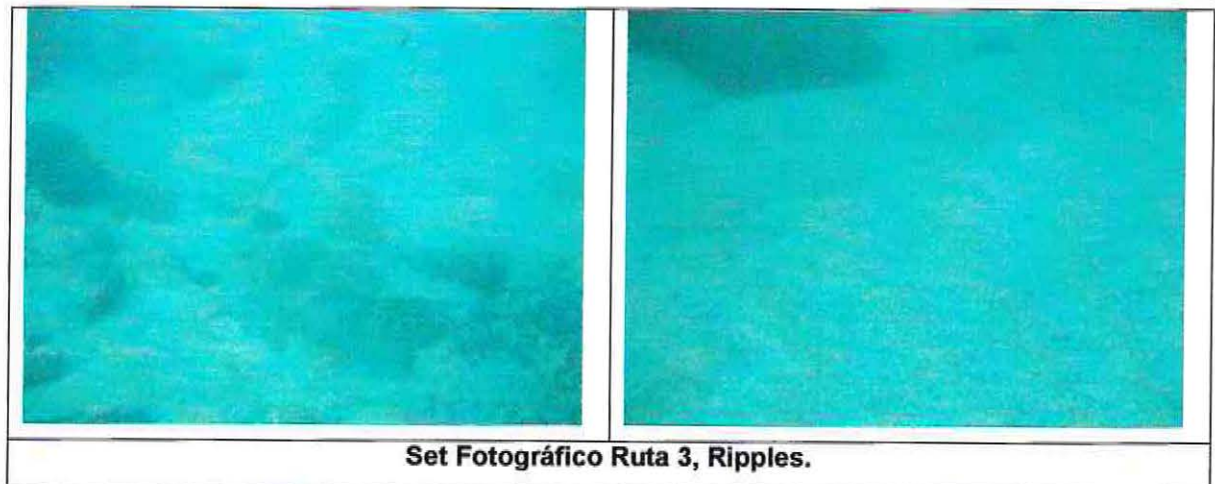
Sólo se detecta presencia de rocas superficiales con incrustaciones algales, debido a que esta ruta está en las cercanías de una gran formación rocosa.



(c) *RUTA 3*

Se detectan pequeñas zonas de arena, con ripples y depositación de rocas de menor tamaño. Nuevamente hay presencia de rocas cubiertas por pelillo y algas, siendo éstas predominantes de esta ruta de sondeo fotográfico.





(d) RUTA 4

En esta ruta las condiciones encontradas cambian considerablemente respecto de las zonas recorridas anteriormente, si bien aún hay presencia de formaciones rocosas cubiertas de pelillo y una escasa presencia de algas, se advierte una extensión de arena predominante en esta ruta. El sedimento encontrado en esta zona abarca una amplia zona tanto costa afuera como hacia la playa con diámetro aparentemente fino. Esta abundancia de arena podría deberse a la cercanía relativa con la playa.



4.4.3 COMENTARIOS GENERALES

Se advierte una escasa presencia de arena hacia aguas profundas, pasando a predominar las rocas cubiertas por pelillo y comunidades algales de extensión y abundancia baja. Por lo tanto se concluye que en general el fondo es predominantemente rocoso con focos aislados de arena y escasa vegetación de algas.

En la Figura 31 se presenta de manera ilustrada la zonificación del fondo marino de Playa El Papagayo.

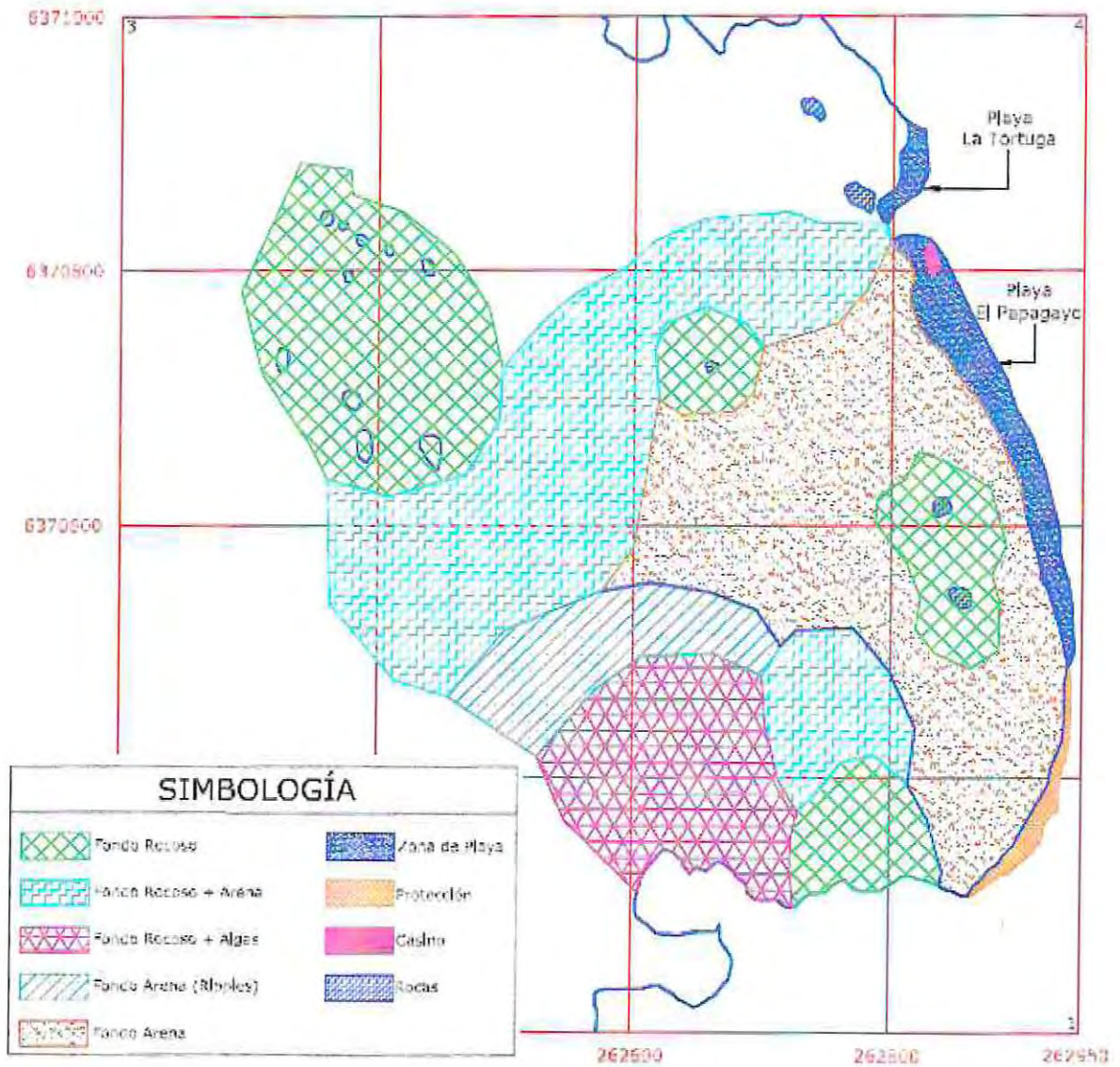


Figura 31: Esquema de clasificación del fondo marino.
(Fuente: Elaboración Propia).

4.5 FUNCIONAMIENTO MORFODINÁMICO

4.5.1 CLASIFICACIÓN DE LA PLAYA

El Papagayo se ubica en la costa oeste de la Península de los Molles y su configuración en planta corresponde a una playa encajada. Esta condición la adquiere producto de la protección conjunta de Punta Artesas y la Península de los Molles.



Figura 32: Puntos de encajonamiento de Playa El Papagayo.
(Fuente: Elaboración Propia).

(a) FUENTES DE SEDIMENTO CERCANAS

Las fuentes de sedimento más cercanas a la playa El Papagayo son la desembocadura del Río Aconcagua (por el sur) y el Estero Campiche (por el Norte). El Río Aconcagua se ubica a una distancia de 15 km aproximadamente al Sur, mientras que el estero Campiche está a 6 Km, al interior de la Bahía de Quintero.



Figura 33: Ubicación de las fuentes de sedimento más cercanas.
(Fuente: Elaboración Propia).

Cada una de estas fuentes de sedimento tiene un funcionamiento estimado de acuerdo a lo mostrado en las Figuras 34 y 35.

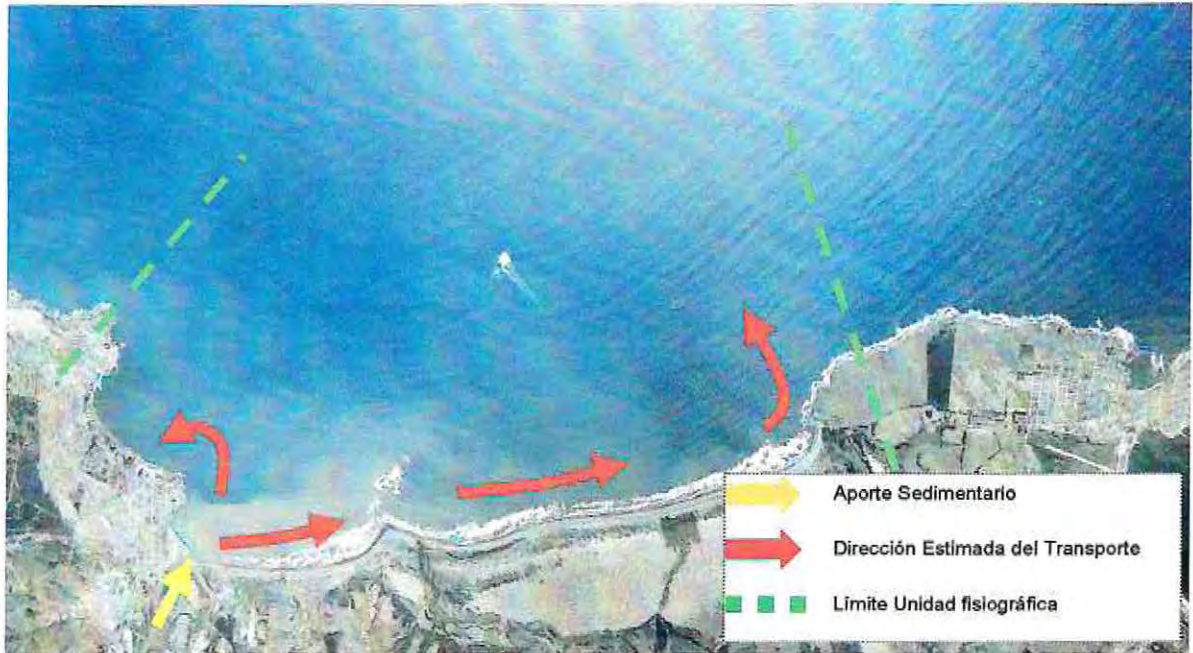


Figura 34: Funcionamiento del Río Aconcagua.
(Fuente: Elaboración Propia).

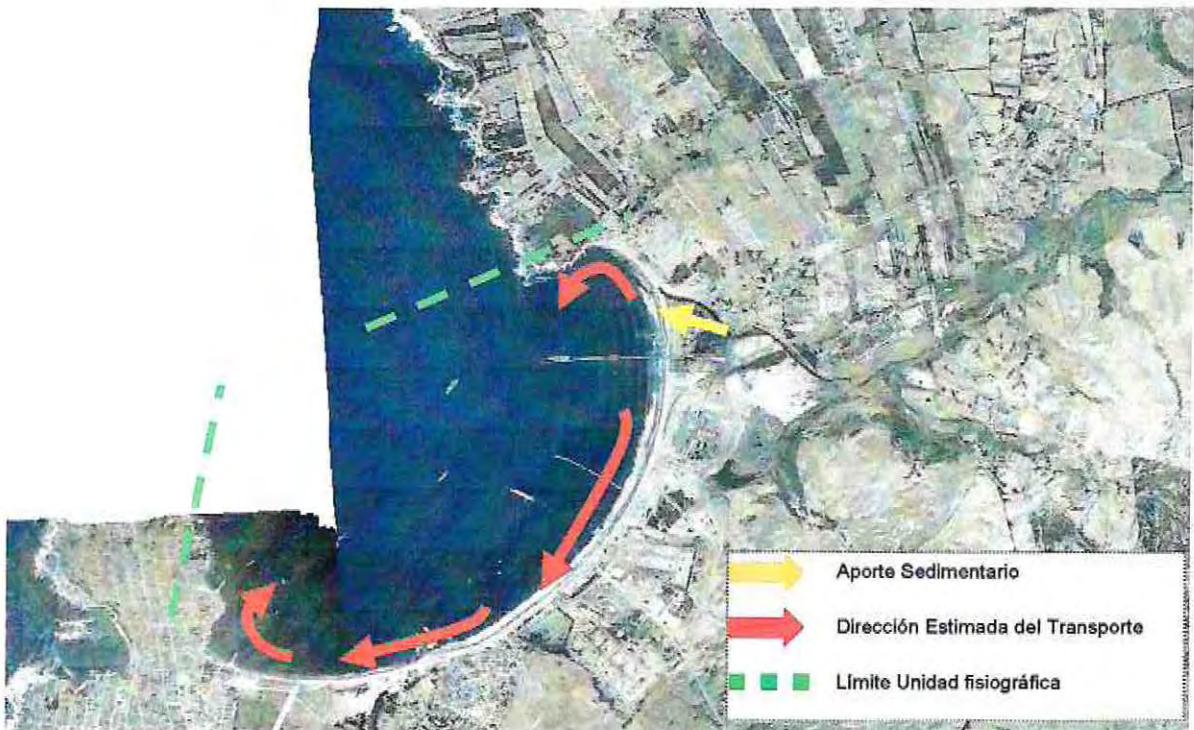


Figura 35: Funcionamiento del Estero Campiche.
(Fuente: Elaboración Propia).

El Río Aconcagua aporta sedimentos que se distribuyen hacia playas de la comuna de Con-Con y la Playa Ritoque.

Del análisis de Figura 34 se estima que cuando este sedimento comienza a viajar hacia el norte se encuentra con una configuración geográfica poco favorable para continuar su camino hacia Playa El Papagayo, siendo modificada su trayectoria hacia aguas profundas. Por otro lado de la Figura 35, se desprende que el estero Campiche abastecería de sedimentos a la Playa la Herradura en un sistema sedimentario marcado por la presencia de la Península de los Molles y Punta Ventanillas.

De este modo se concluye que el sedimento presente en la Playa El Papagayo tiene su origen en la meteorización local, tanto de las rocas existentes, como de los farellones de fondo de playa, siendo poco probable el aporte del río y esteros existentes.

4.6 ESTIMACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

4.6.1 GENERALIDADES

Para la determinación del transporte potencial longitudinal de sedimentos se empleara dos enfoques. El primero consiste en la aplicación de modelo numérico incluido en el Sistema de Modelado Costero (SMC) llamado "Modelo de Oleaje, corrientes y Evolución Morfológica de Playas" (MOPLA), mientras que el segundo es la aplicaciones de métodos de gabinete implementados en planilla numérica.

En MOPLA sólo se ha estimado el transporte de sedimentos para el grano equivalente obtenido en PPY EQ Total¹⁴ y en los métodos de gabinete el tamaño del grano considerado en la evaluación del transporte se ha sensibilizado para todas las muestras sumergidas obtenidas en terreno, siendo estas PPY - 1, PPY - 4, PPY - 7, PPY - 9 y PPY - 11, y las condiciones medias de acuerdo a lo indicado en el análisis de variación longitudinal del perfil tomando las propiedades de la muestra ficticia PPY EQ Total (ver Tabla 17). Finalmente la validación de alguna de las metodologías probadas es llevada a cabo en el Capítulo 5: ESTUDIO DE EROSIÓN COSTERA

4.6.2 MODELO NUMÉRICO MOPLA

MOPLA es un modelo que agrupa diversos esquemas numéricos. El proceso de solución de se basa en la propagación de oleaje (mediante las ecuaciones de pendiente suave, resolviendo la fase y con aproximación parabólica), generación de corrientes por rotura (mediante el cálculo de el exceso de flujo de momento) y la estimación del transporte longitudinal de sedimentos (mediante modelos dependientes de las corrientes y el oleaje). Los modelos numéricos incluidos en MOPLA y su función se presentan resumidos en la Tabla 18, mientras que las ecuaciones de gobierno empleadas para la solución se incluyen en el Anexo II.

¹⁴ Corresponde a la curva granulométrica equivalente para toda la Playa El Papagayo.

Tabla 18: Resumen de modelos numéricos incluidos en MOPLA.

(Fuente: Elaboración Propia).

Modelo Híbrido	Modelo Numérico	Función
MOPLA	OLUCA SP	Propagación de oleaje espectral.
	COPLA SP	Generación de corrientes inducidas por rotura de oleaje espectral.
	EROS SP	Estimación del transporte longitudinal de sedimentos bajo oleaje espectral.

Teniendo como base la estadística de oleaje de 20 años, se han seleccionado un conjunto de alturas, periodos y direcciones de incidencia para la evaluación del transporte longitudinal de sedimentos, siendo estos resumidos en la Tabla 19, donde se indican los valores considerados y la representatividad de estos en la muestra total.

Tabla 19¹⁵: Valores de Hmo, Tp y Dir para el cálculo del transporte de sedimentos.

(Fuente: Elaboración Propia).

Parámetro	Valores	Representatividad
Alturas [m]	1,0 – 1,3 – 1,5 – 1,7 – 1,9 – 2,1 2,3 – 2,6	91,48%
Periodos [s]	10 – 13 – 15 – 18	91,17%
Direcciones [°]	240 – 250 – 260 – 270	93,38%

Los casos a considerar son el resultado de la combinatoria de las 8 alturas, con los 4 periodos y 4 direcciones consideradas, formando 128 casos.

El software MOPLA mediante la aplicación de su modelo numérico de Erosión y Sedimentación (EROS) aplica las formulaciones detalladas a continuación.

¹⁵ Todos los datos presentados en la Tabla 19 corresponden a condiciones de oleaje en el punto de extracción de la estadística de 20 años y su representatividad se ha seleccionado desde los valores centrales de las tablas de incidencia, por lo tanto los porcentajes restantes (8% aproximadamente para todos los casos) son valores que están por debajo del valor mínimo y por sobre el valor máximo del intervalo.

(a) BAILARD (1981)

$$\bar{q}_t = \bar{q}_{bo} - \bar{q}_{bs} + \bar{q}_{so} - \bar{q}_{ss} \quad \text{Ecuación 71}$$

$$\bar{q}_{bo} = \frac{C_f \varepsilon_B}{g(s-1)\tan\phi} \langle |\bar{u}|^2 \bar{u} \rangle \quad \text{Ecuación 72}$$

$$\bar{q}_{bs} = \frac{C_f \varepsilon_B \tan\beta}{g(s-1)\tan\phi} \langle |\bar{u}|^3 \rangle > \bar{i} \quad \text{Ecuación 73}$$

$$\bar{q}_{so} = \frac{C_f \varepsilon_s}{g(s-1)w_s} \langle |\bar{u}|^3 \bar{u} \rangle \quad \text{Ecuación 74}$$

$$\bar{q}_{ss} = \frac{C_f \varepsilon_s^2 \tan\beta}{g(s-1)w_s} \langle |\bar{u}|^5 \rangle > \bar{i} \quad \text{Ecuación 75}$$

Los términos representan:

- q_t: Transporte total por fondo y suspensión (q_x, q_y) [m³/s/m].
- q_{bo}: Transporte por fondo sobre lecho plano [m³/s/m].
- q_{bs}: Transporte por fondo debido al efecto de la pendiente [m³/s/m].
- q_{so}: Transporte en suspensión sobre lecho plano [m³/s/m].
- q_{ss}: Transporte en suspensión debido al efecto de la pendiente [m³/s/m].

Donde:

- g: Aceleración de la gravedad [m/s²].
- s: Es la densidad relativa
- ρ_s: Densidad del sedimento [ton/m³].
- ρ_w: Densidad del agua [ton/m³].
- C_f: Coeficiente de fricción, tal que τ = ρC_f|u|u
- τ: Tensión tangencial en el fondo [Nw/m²].
- U: Velocidad en el fondo debida a la acción conjunta de ola-corriente [m/s].
- φ: Ángulo de rozamiento interno del sedimento [°].
- tanβ: Pendiente del lecho.
- i: Vector unitario en la dirección pendiente arriba.
- w_s: Velocidad de caída de grano [m/s].
- ε_B: Factor de eficiencia del transporte por fondo (=0.1)
- ε_s: Factor de eficiencia del transporte en suspensión (=0.02)
- ⟨.⟩: Es un promedio temporal
- |. |: Valor absoluto.

(b) SOULSBY – LEO VAN RIJN (1997)

$$q_t = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0,18}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{\frac{1}{2}} - \bar{U}_{cr} \right]^{2,4} \quad \text{Ecuación 76}$$

$$A_{sb} = \frac{0,005 \left(\frac{D_{50}}{h} \right)^{1,2}}{\left[(s-1)gD_{50} \right]^{1,2}} \quad \text{Ecuación 77}$$

$$A_{ss} = \frac{0,012 D_{50} D_*^{-0,6}}{\left[(s-1)gD_{50} \right]^{1,2}} \quad \text{Ecuación 78}$$

$$C_D = \left[\frac{0,4}{\ln \left(\frac{h}{z_o} - 1 \right)} \right]^2 \quad \text{Ecuación 79}$$

$$\bar{U}_{cr} = 0,19(D_{50})^{0,1} \log \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0,1 \leq D_{50} \leq 0,5mm$$

$$\bar{U}_{cr} = 8,5(D_{50})^{0,6} \log \left(\frac{4h}{D_{90}} \right) \quad 0,5 \leq D_{50} \leq 2mm$$

Ecuación 80

$$D_* = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}} D_{50} \quad \text{Ecuación 81}$$

Donde

- q_t: (q_x, q_y) (m³/s/m).
- A_s: A_{sb} + A_{ss}
- U: Velocidad promediada en la vertical [m/s].
- U_{RMS}: Velocidad orbital cuadrática media [m/s].
- U_{cr}: Velocidad crítica de inicio de movimiento (asumiendo K_s = 3D₉₀, D₉₀ = 2D₅₀).
- h: Profundidad [m].
- D₅₀: Diámetro medio del sedimento [m].
- D₉₀: Diámetro que es superado por un 10% en peso [m].
- z_o: Rugosidad del fondo (≈ 0,006 m)
- s: Densidad relativa.
- ν: Viscosidad cinemática del agua (2*10⁻⁶ m²/s).

4.6.3 MÉTODOS DE GABINETE

Se aplicarán las siguientes formulaciones para la evaluación del transporte potencial longitudinal de sedimentos.

(a) *BAILARD – BAGNOLD (1981)*

$$\vec{q}_T = \vec{q}_{b,w} + \vec{q}_{s,w} \quad \text{Ecuación 82}$$

$$\vec{q}_{b,w} = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot f_w \cdot e_b}{(\rho_s - \rho)g \tan \gamma} \left[|U|^2 U - \frac{\tan \beta}{\tan \gamma} |U|^3 \right] \cdot \hat{i}_B \quad \text{Ecuación 83}$$

$$\vec{q}_{s,w} = \frac{1/2 \cdot \rho \cdot f_w \cdot e_s}{(\rho_s - \rho)g \cdot w_s} \left[|U|^3 U - \frac{e_s}{w_s} \tan \beta \cdot |U|^5 \right] \cdot \hat{i}_B \quad \text{Ecuación 84}$$

Donde:

- q_T : Transporte de sedimentos total [$m^3/s/m$].
- $q_{b,w}$: Transporte de sedimento por fondo [$m^3/s/m$].
- $q_{s,w}$: Transporte de sedimento en suspensión [$m^3/s/m$].
- U : Velocidad orbital [m/s].
- e_b, e_s : Eficiencia del transporte por fondo y suspensión respectivamente. Usualmente toman valores igual a 0,1 y 0,02 respectivamente.
- f_w : Coeficiente de fricción.
- β : Pendiente de fondo.
- w_s : Velocidad de caída del grano [m/s].
- \hat{i}_B : Vector unitario en la dirección de la pendiente de fondo.
- γ : Ángulo de fricción dinámica. ($\tan \gamma = 0,6$).
- ρ : Densidad volumétrica del agua de mar [Kg/m^3].
- ρ_s : Densidad volumétrica del sedimento [Kg/m^3].
- g : Aceleración de gravedad.

(b) LEO VAN RIJN (1986) – PARA OLEAJE TIPO SWELL.

$$q_{w,net} = -0,00063[(S-1)g]^{0,5} (d_{50})^{1,5} \left[\alpha_s (\psi_{crest} - \psi_{cr})^{1,7} - \alpha_s (\psi_{trough} - \psi_{cr})^{1,7} \right] \quad \text{Ecuación 85}$$

$$\psi_{crest, trough, cr} = \frac{(\hat{U}_{crest, trough, cr})^2}{(S-1) \cdot g \cdot d_{50}} \quad \text{Ecuación 86}$$

Donde:

- $q_{w,net}$: Transporte total de sedimentos [m³/s/m].
- U_{crest} : Velocidad peak en la cresta de la ola [m/s].
- U_{trough} : Velocidad peak en el valle de la ola [m/s].
- U_{cr} : Velocidad de inicio del movimiento [m/s].
- γ : Ángulo de respuesta (30°).
- β : Pendiente local.
- S : Densidad relativa.
- d_{50} : Diámetro medio de la partícula [m].
- α_s : Factor de pendiente.

(c) KAMPHUIS (1990) – THE QUEENS FORMULA.

$$\frac{Q}{p \frac{H_b^3}{T}} = K \left(\frac{H_b}{L_o} \right)^a \tan^b(\alpha) \left(\frac{H_b}{d_{50}} \right)^c \sin^d(2\phi_b) \quad \text{Ecuación 87}$$

$$S = \frac{Q}{(1-p)\rho_s} \quad \text{Ecuación 88}$$

Donde:

- Q : Transporte longitudinal de sedimentos [kg/s].
- S : Transporte de sedimentos [m³/s/m].
- p : Densidad volumétrica del agua de mar [kg/m³].
- H_b : Altura de ola rompiente [m].
- T : Periodo peak [s].
- d_{50} : Diámetro medio de la partícula [m].
- ϕ_b : Ángulo de incidencia de la ola rompiente.
- α : Pendiente de la playa.
- K : Coeficiente con valor igual a $1,3 \times 10^{-3}$.
- a : Coeficiente con valor igual a -1,25.
- b : Coeficiente con valor igual a 0,75.
- c : Coeficiente con valor igual a 0,25.
- d : Coeficiente con valor igual a 0,60.

Para mayor información de las formulaciones de transporte de sedimentos empleadas consultar Ref. 34: van Rijn, Leo C. "Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas". Aqua Publications, Emmeloord NL, 2005.

4.6.4 RESULTADOS OBTENIDOS

(a) MÉTODOS UTILIZADOS EN MOPLA

Considerando que el modelo OLUCA-SP (esquema numérico de propagación de oleaje en MOPLA) resuelve la fase completa, el dimensionamiento de las grillas se realiza en base al periodo mínimo a propagar, ya que su longitud debe ser representada correctamente en aguas someras. Es por este motivo que se ha generado una grilla numérica cuadrada con resolución de 10 metros, obteniendo así 10 puntos por longitud de la onda, siendo estos representativos del fenómeno oscilatorio.

Las bases de datos batimétricas corresponden a las mismas utilizadas en la propagación de oleaje con STWAVE, y se ilustra en la Figura 36.

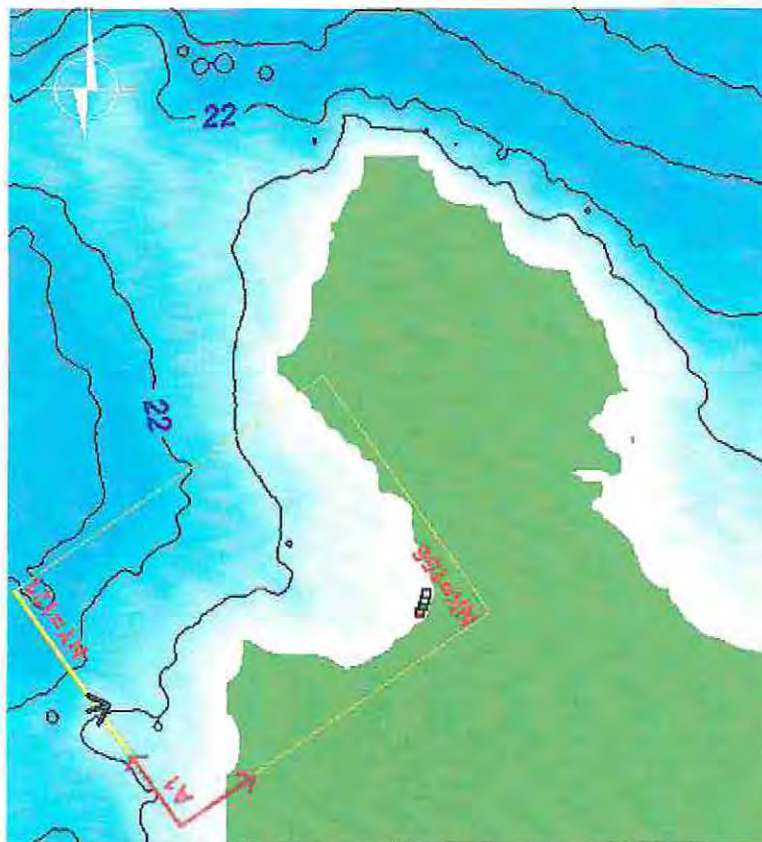


Figura 36: Batimetría y grilla empleada en MOPLA.
(Fuente: Elaboración Propia).

Como la estadística de oleaje se encuentra en un punto donde la profundidad es de 25 metros, la propagación en OLUCA SP se hizo mediante el espectro frecuencial TMA y la función de dispersión direccional normalizada propuesta por *Borgman (1984)*. A modo de ejemplo, en las Figuras 37, 38 y 39 se ilustran los espectros de frecuencias, direcciones y bidimensional, respectivamente, obtenidos en MOPLA para una ola $H_{mo} = 1.5$ [m], con $T_p = 13$ [s] y proveniente desde una dirección geográfica de 260° . Mientras que la Figura 41 muestra el espectro bidimensional después de la rompiente.

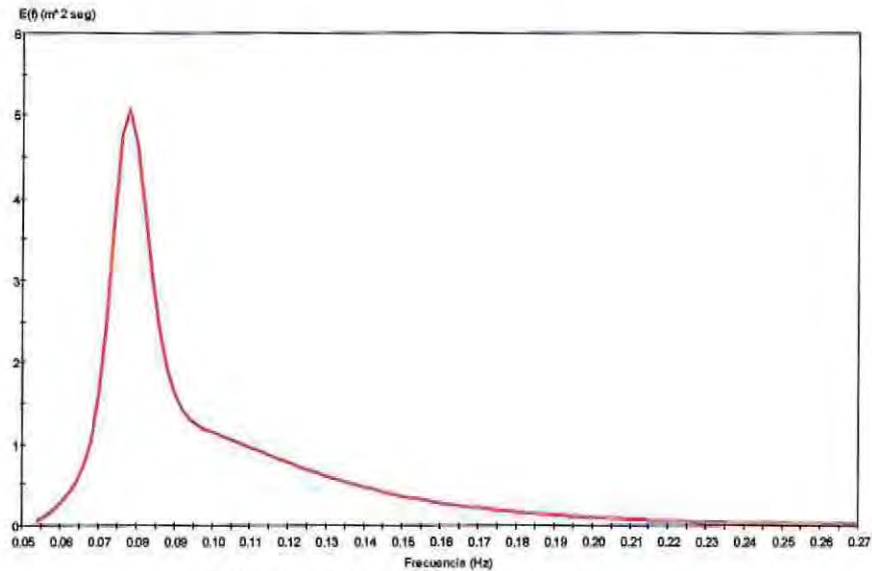


Figura 37: Espectro TMA para el oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia).

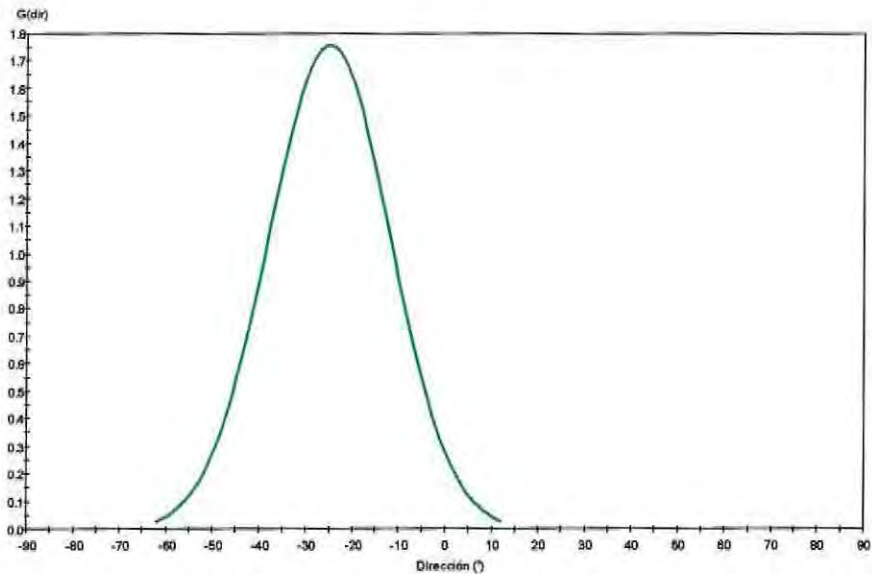


Figura 38: Espectro de direcciones para el oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia).

El espectro de dirección mostrado en la Figura 38 ha sido graficado para el ángulo matemático respecto de la ortogonal de la grilla numérica empleada en la modelación.

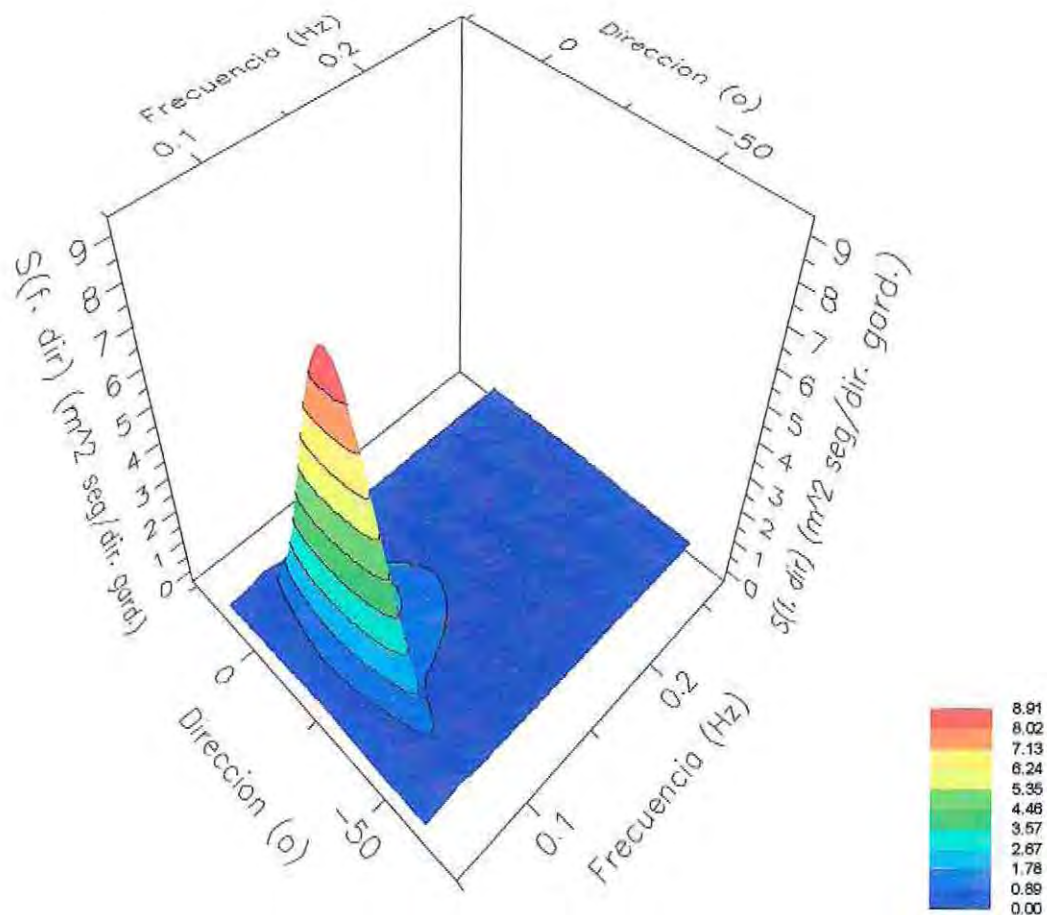


Figura 39¹⁶: Espectro bidimensional antes de la rompiente.

(Fuente: Elaboración Propia).

En la zona de rompiente el oleaje genera corrientes (representadas en el modelo mediante al módulo COPLA-SP) las cuales provocan el transporte de sedimentos. En la Figura 40 se muestra la transformación espectral del caso seleccionado, en una profundidad objetivo de 5 metros. Por otro lado en la Figura 41 se muestra la transformación bidimensional.

En la transformación espectral mostrada en la Figura 40 se advierte una disminución de energía debido a la disipación y además una transferencia de ésta desde las altas a las bajas frecuencias. Esta modificación del espectro de frecuencias es esperable y se hace más drástica a medida que el oleaje se acerca a la zona de rompientes.

¹⁶ Nótese que el eje de direcciones corresponde al ángulo matemático que forma el oleaje con la grilla.

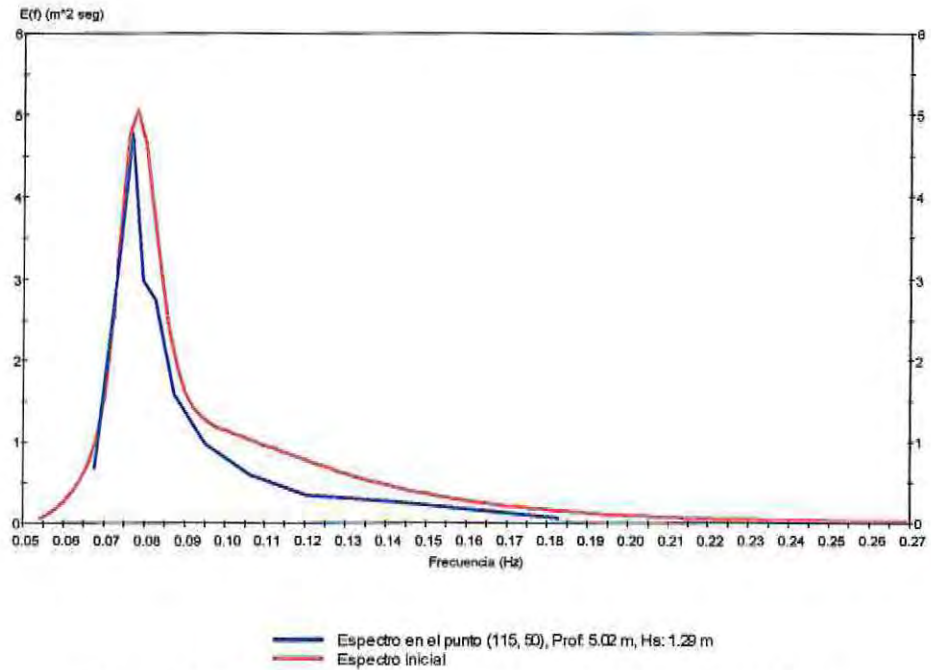


Figura 40: Transformación del espectro TMA para el oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia).

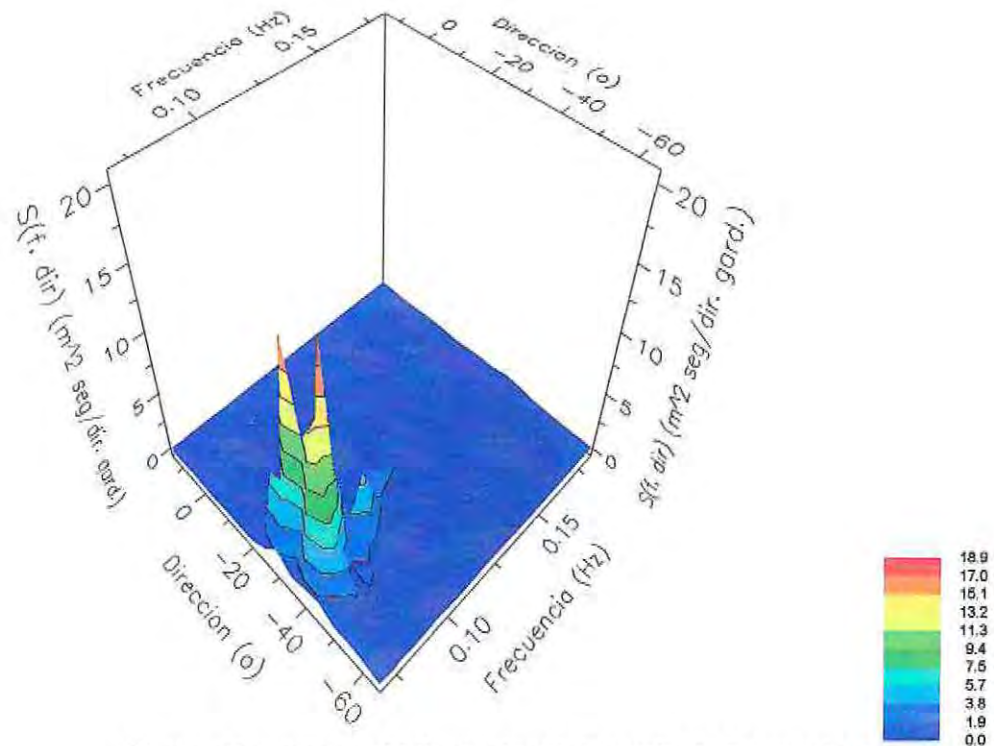


Figura 41: Espectro bidimensional después de la rompiente.
(Fuente: Elaboración Propia).

En la Figura 42 se ilustra el campo de corrientes generadas para oleaje de $H_{mo} = 1.5$ [m], $T_p = 13$ [s] y dirección variable desde 240° a los 270° . Nótese que esta condición de oleaje genera una circulación con doble flujo incidente en la Playa El Papagayo. Uno de ellos ingresa desde una componente NW, mientras que el segundo proviene desde el SW provocando de esta manera vórtices y turbulencias en la zona central del área de estudio.

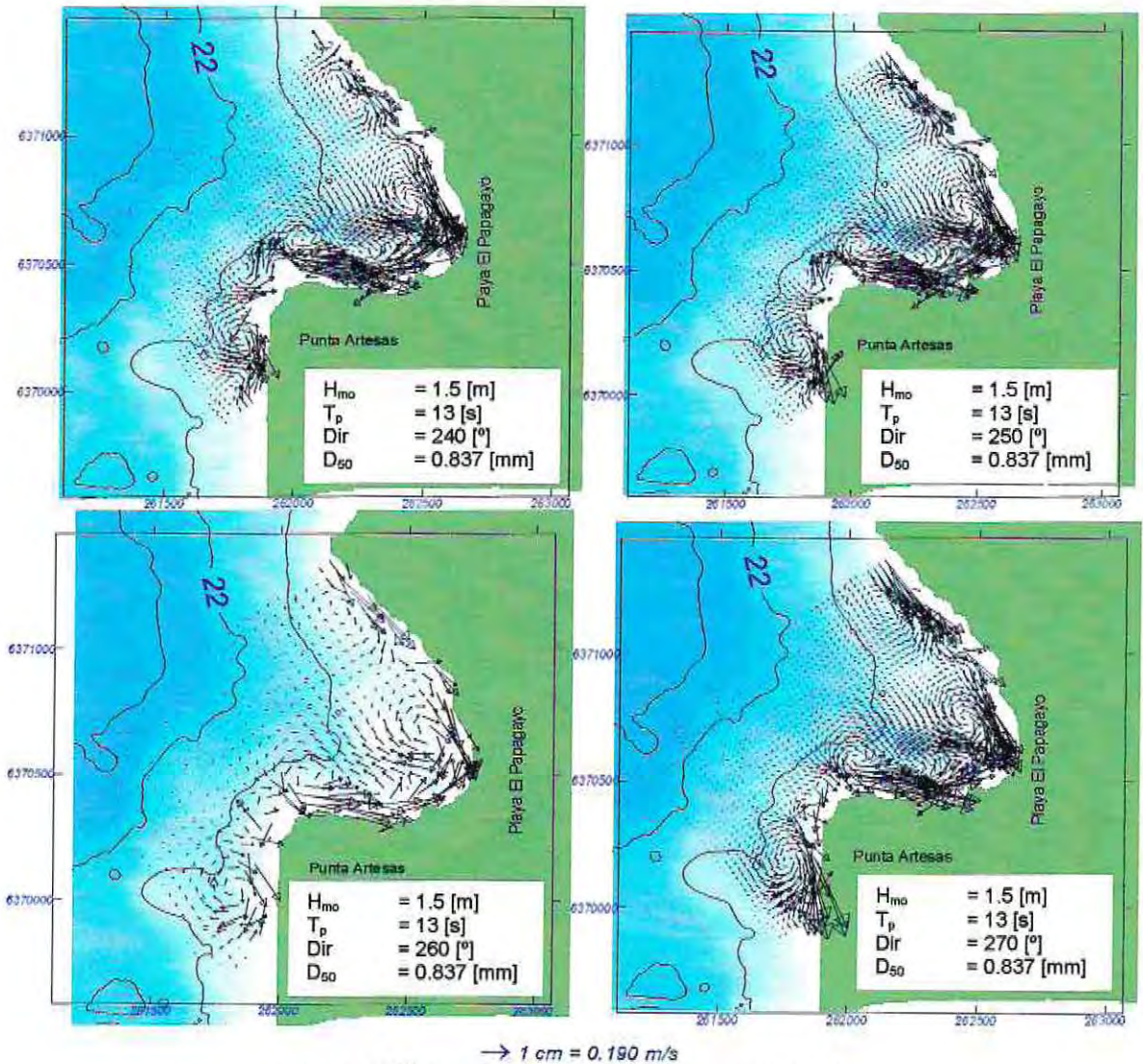


Figura 42¹⁷: Corrientes generadas por el oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia).

Para los casos seleccionados se logra apreciar (Figura 42) que el circuito de circulación de las corrientes no se ve afectado direccionalmente, sólo se modifica la magnitud, a pesar de que el oleaje generador varía su dirección de incidencia.

¹⁷ Nótese que los vectores que ingresan hacia la costa, corresponden sólo a una representación gráfica y ajuste de escala de los mismos, y no representan errores en la modelación.

Analizando el patrón de circulación y contrastándolo con el esquema de clasificación del fondo marino (Figura 31), se advierte la concordancia de que en las zonas de mayor velocidad de la corriente el fondo es rocoso, mientras que en las de baja velocidad hay presencia de arena.

El transporte de sedimentos para cada una de las formulaciones empleadas se resume en la Tabla 20, este ha sido obtenido considerando todos los casos simulados.

Tabla 20: Resultados del transporte de sedimentos desde el modelo MOPLA.
(Fuente: Elaboración Propia).

Muestra	Bailard (1981) [m ³ /año/m]	Leo van Rijn (1998) [m ³ /año/m]
PPY - EQ	386.141	392.614

Del análisis de la Tabla 20 se advierte una diferencia de 1,6% entre ambas formulaciones.

En la Figura 43 se ilustra el transporte de sedimentos para una las mismas condiciones de oleaje indicadas anteriormente. El comportamiento direccional del transporte de sedimentos tiene forma similar a lo presentado para las corrientes (ver Figura 42), las mayores magnitudes se presentan en Punta Artesas.

En Playa El Papagayo el transporte potencial de sedimentos estimado por el modelo MOPLA indica que la arena se movería en dirección offshore en el sector sur de la zona de estudio, mientras que en el sector norte esta bajaría hacia el sector sur.

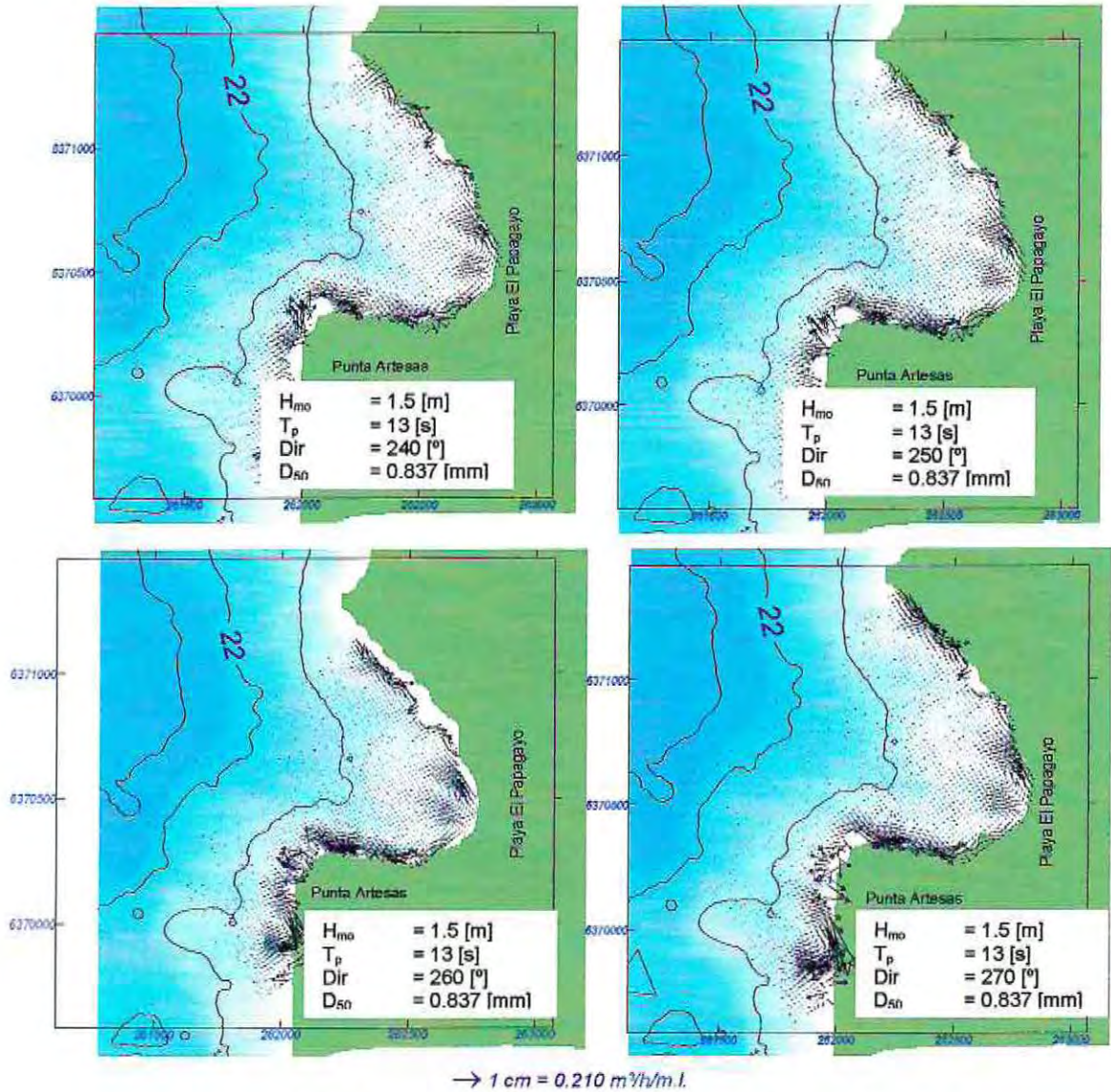


Figura 43¹⁸: Transporte de sedimentos generado por el oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia).

(b) MÉTODOS DE GABINETE

Los resultados obtenidos para cada una de las formulaciones se resumen en la Tabla 21 y su comparación en el Gráfico 12. Las tasas obtenidas de la aplicación de cada uno de los métodos de gabinete empleados presentan una gran variabilidad (esto se debe principalmente a que cada una de las formulaciones evaluadas han sido obtenida por sus autores en modelos físicos, en base a diversas consideraciones) siendo la de mayor magnitud la ecuación de Queens con un transporte

¹⁸ Nótese que los vectores que ingresan hacia la costa, corresponden sólo a una representación gráfica y ajuste de escala de los mismos, y no representan errores en la modelación.

promedio para las muestras analizadas de 20.437.649 m³/año/m, seguida de Leo van Rijn con un promedio de 449.201 m³/año/m y finalmente Bagnold con 485 m³/año/m.

Tabla 21: Resultados del transporte de sedimentos para los métodos de gabinete.

(Fuente: Elaboración Propia).

Muestra	D50 [mm]	Bagnold (1981) [m ³ /año/m]	van Rijn (1986) [m ³ /año/m]	Queens (1990) [m ³ /año/m]
PPY - 1	1,69	-92	1.309.419	17.624.775
PPY - 4	1,51	-38	927.131	18.106.271
PPY - 7	0,59	1.192	44.697	22.298.418
PPY - 9	0,61	1.119	49.344	22.753.355
PPY - 11	0,97	245	226.126	20.213.074
PPY - EQ	0,84	483	138.488	21.000.002

Los resultados negativos mostrados en la Tabla 21, reflejan el transporte que es hacia la playa, es decir, nutre la playa, mientras que las tasas positivas indican un transporte de sedimentos costa afuera, es decir, un caudal sólido que abandona la Playa El Papagayo. La gran diferencia de magnitud en la estimación del transporte de sedimentos para cada una de las formulaciones implementadas, se debe a que de ellas han sido obtenidas mediante diversos supuestos, sin embargo, sus tasas han sido bien evaluadas y comparadas con resultados obtenidos por otros autores en sus publicaciones (Ref. 5, Ref. 16 y Ref. 34).

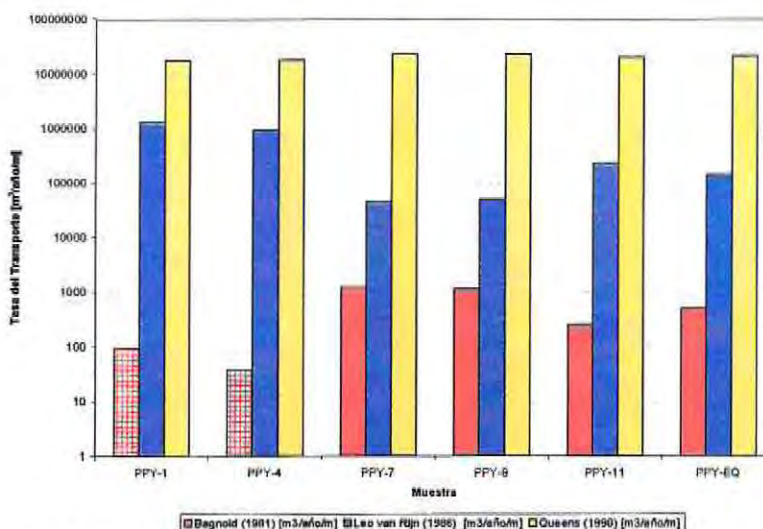


Gráfico 12¹⁹: Comparación de los resultados obtenidos.

(Fuente: Elaboración Propia).

¹⁹ Se ha graficado el valor absoluto de la tasa de transporte de sedimentos en escala logarítmica. Las tasas de Bagnold (1981) para la muestra PPY -1 y PPY - 4 corresponde a valores negativos, es por ese motivo que se han dispuesto con textura diferente.

5 ESTUDIO DE EROSIÓN COSTERA

5.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PLAYA EL PAPAGAYO

Playa El Papagayo contaba hasta fines de la década de los 80, con una abundante vegetación marina (algas *Macrocystis sp.* y *Lessonia sp.*), que al interactuar con las olas tenía la función de una barrera flexible, disipando la energía. Debido a esta abundancia, era común encontrar en las arenas de la playa acumulaciones de algas, que gradualmente comenzaban su proceso de degradación, emanando olores desagradables.

De acuerdo a los registros fotográficos de los cuales se dispone (Figura 44 y 45), la Playa El Papagayo entre los años 1960 y 1979 contaba con una abundante cantidad de algas y el espacio suficiente como para la instalación de carpas y tiendas que traían los visitantes.

En las Figura 44 y 45 se aprecian las condiciones de la playa en 1960 y 1979, respectivamente.



Figura 44: Playa El Papagayo en el año 1960.
(Fuente: Archivo Histórico Personal).



Figura 45: Playa El Papagayo en el año 1979.
(Fuente: Archivo Histórico Personal).

A lo largo de su historia Playa El Papagayo se ve afectada por un sin número de eventos históricos, los cuales de cierto modo han contribuido en la conformación del estado actual de la playa. Algunos de estos hitos históricos se detallan a continuación.

En Octubre de 1980 el Servicio Nacional de Pesca autoriza la extracción de algas de los géneros *Gracilaria*, *Iridaea* y *Lessonia*, de las playas existentes en el litoral comprendido entre la IV y X región. El retiro de las especies existentes en la Playa El Papagayo tiene consecuencias perjudiciales en el funcionamiento de la playa, provocando la erosión de la berma e incluso los farellones de fondo, con el consecuente riesgo estructural a las viviendas que se ubican en la parte superior de éste. Por este motivo la Ilustre Municipalidad de Quintero en el año 1987 solicita al Instituto de Oceanología de la Universidad de Valparaíso que evalúe la posibilidad de replantar algas en la playa, debido a los problemas antes mencionados.

En Marzo de 1989 la Dirección de Obras Portuarias realiza una visita al sector, presentando en Abril del mismo año un informe (parte de la Ref. 8) que concluye lo siguiente:

- La zona afectada corresponde a una extensión aproximada de 300 metros, donde se aprecia que el oleaje alcanza el acantilado que delimita los sitios privados de 14 propietarios.
- Se ha generado una socavación del terreno debido a que el run-up alcanza hasta el borde superior del acantilado que tiene unos 10 metros de alto (Figura 46).
- Las socavaciones han provocado asentamientos del terreno originando algunas grietas en el terreno y en la parte posterior de 6 casas particulares.
- Se aprecia desniveles en pisos y terrenos, deslizamientos de materiales desde el acantilado y deterioros en luminarias, cierros y voladizos (Figura 47).



Figura 46: Run-up en una de las casas existentes en el acantilado.
(Fuente: Archivo Histórico Personal).

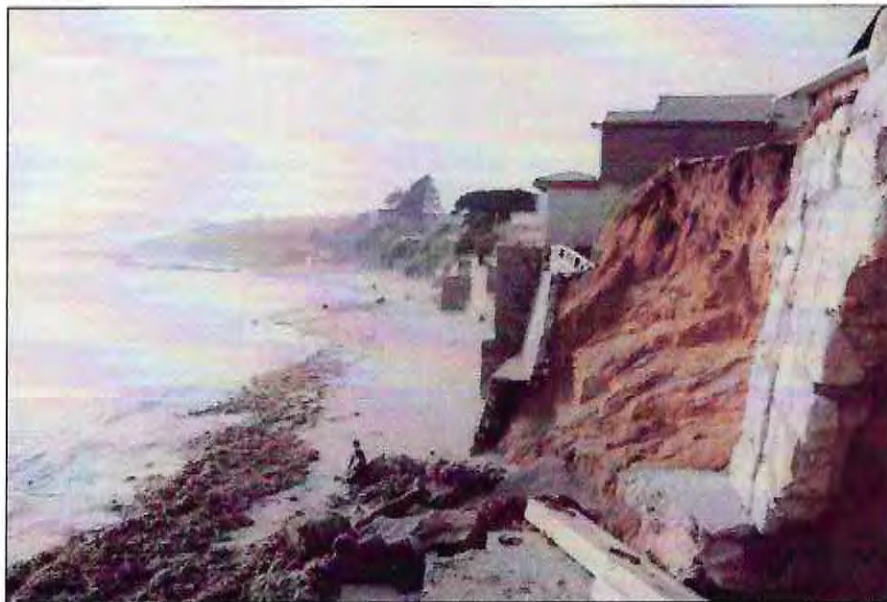


Figura 47: Derrumbes de muros y deslizamiento de terreno en viviendas aledañas.
(Fuente: Archivo Histórico Personal).

En este informe la Dirección de Obras Portuarias (Ref. 8) propone la construcción de una protección de rocas al pie del acantilado, la cual se transformaría posteriormente (1991) en la alternativa de solución adoptada por la Ilustre Municipalidad de Quintero.

A fines de Julio de 1989 un fuerte temporal azota la zona (Gráfico 13) generando múltiples daños en las viviendas del sector debido al remonte del oleaje (Figura 48), los cuales esta vez fueron de mayor magnitud que los registrados hasta la fecha.

La evolución del temporal se muestra en el Gráfico 14. En el caso de las direcciones y considerando la base de datos disponibles no es posible asignar cual es la dirección predominante en el temporal, ya que se desconocen las condiciones de Sea y Swell.

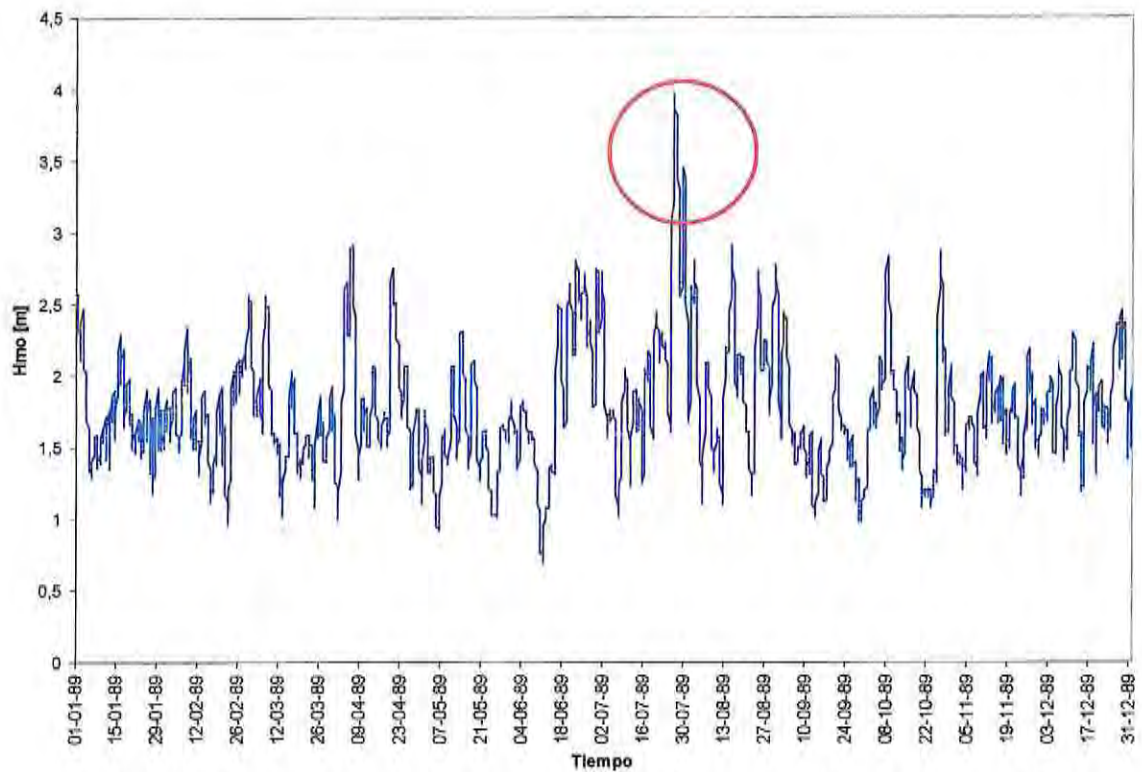


Gráfico 13: Serie de tiempo de altura de oleaje Hmo en el sitio, para el año 1989.
(Fuente: Elaboración Propia).

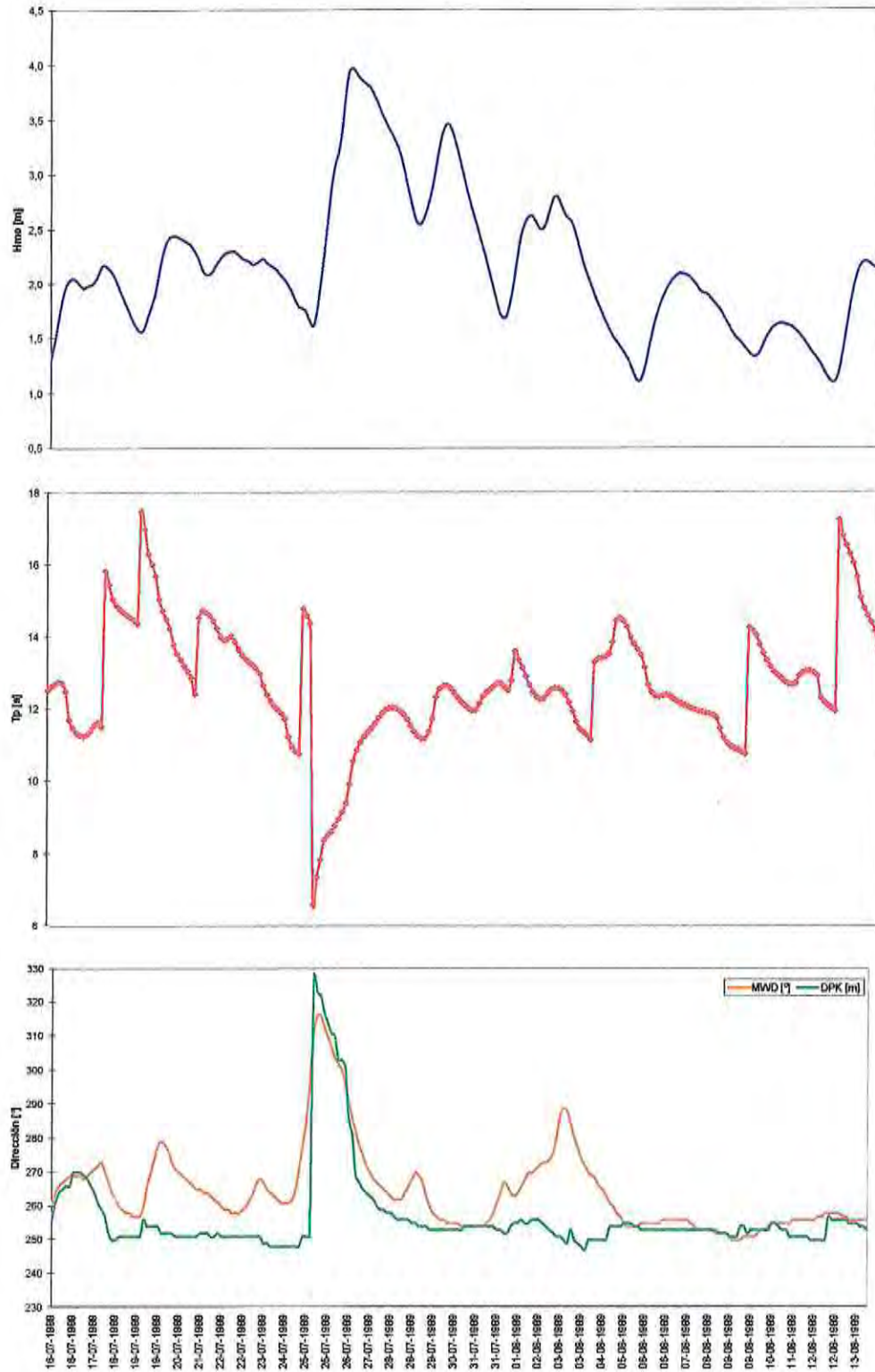


Gráfico 14: Evolución temporal 1989.
(Fuente: Elaboración Propia).

En el año 1995 se presenta un temporal de similares características que el registrado en el año 1989 (ver Gráfico 15).

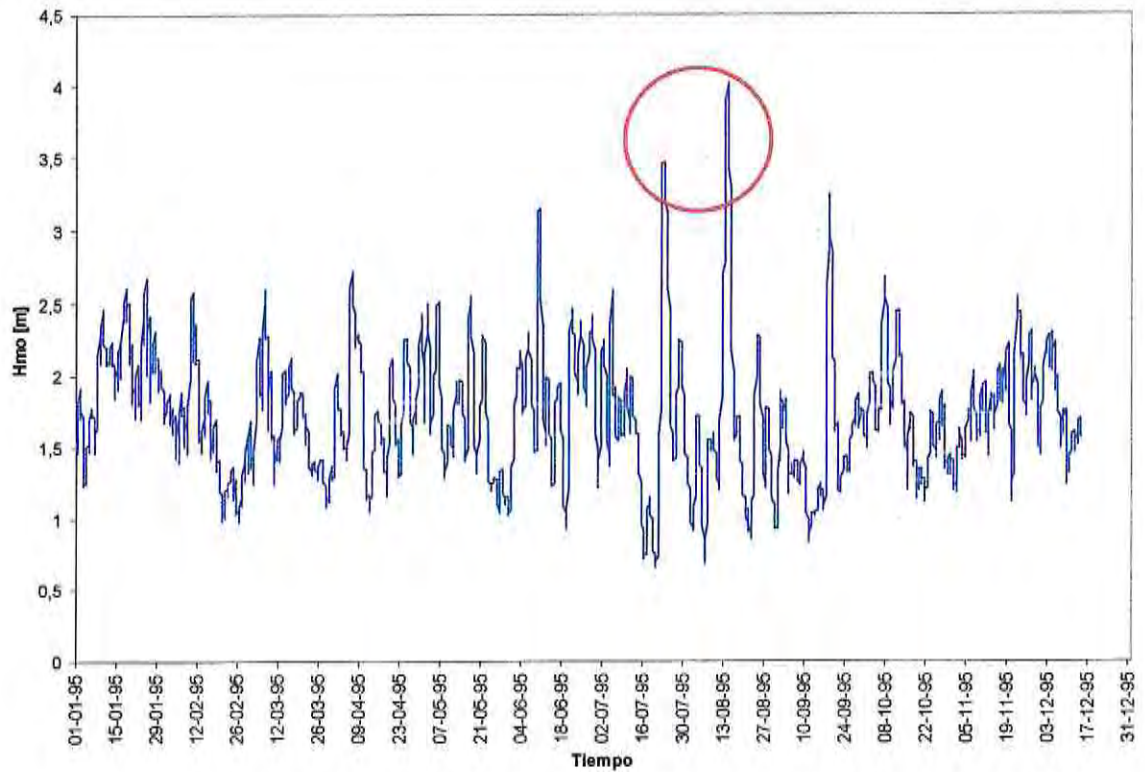


Gráfico 15: Serie de tiempo de altura de oleaje Hmo en el sitio, para el año 1995.
(Fuente: Elaboración Propia).



Figura 50: Registro fotográfico del temporal de 1995 en Playa El Papagayo.
(Fuente: www.quinteroweb.cl).

La evolución del temporal de 1995 se muestra en el Gráfico 16.

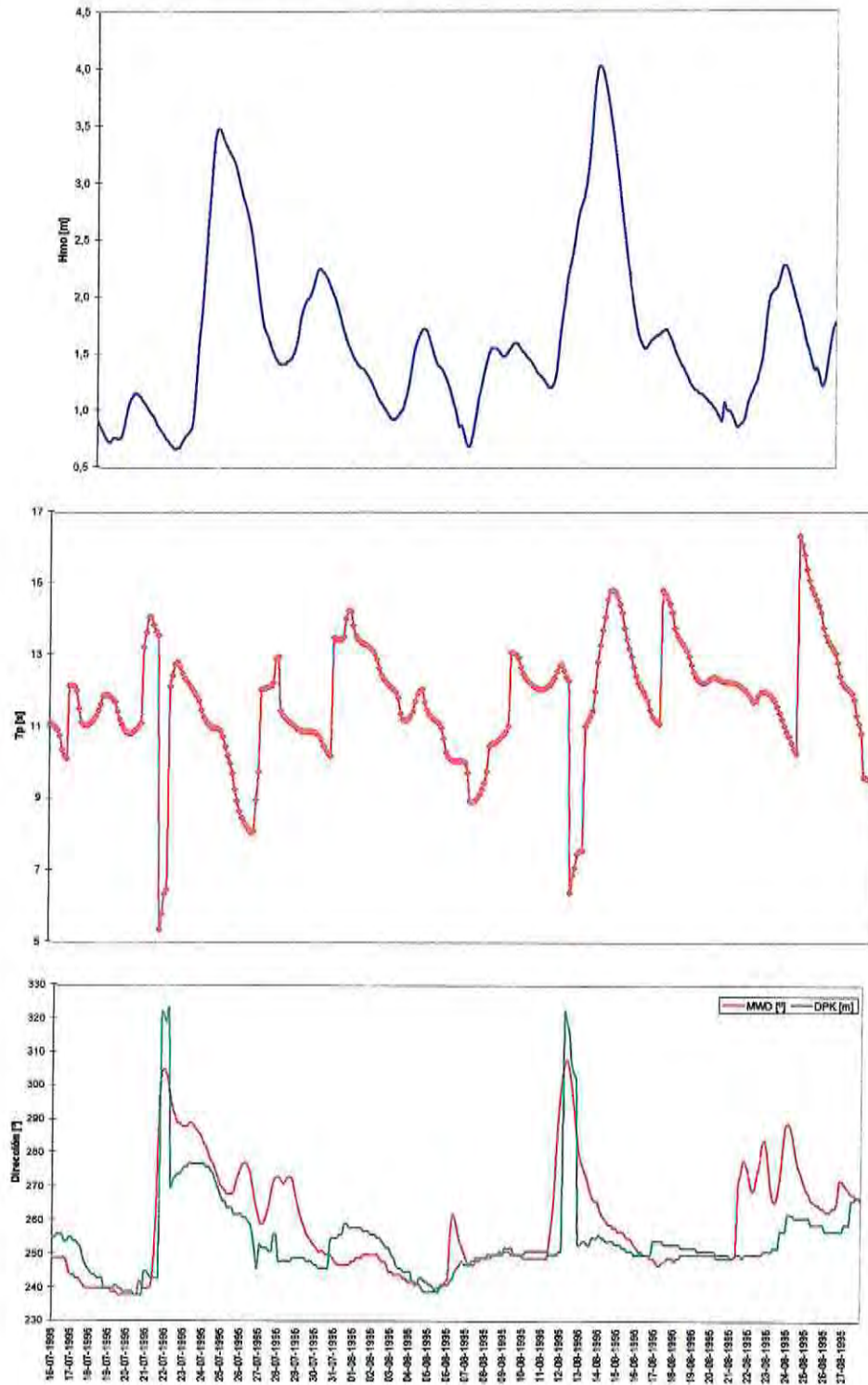


Gráfico 16: Evolución temporal 1995.
(Fuente: Elaboración Propia).

Luego de este temporal no se han registrado a la fecha eventos de características similares a las de 1989 y 1995.

Las condiciones actuales de la Playa El Papagayo se ilustra en el siguiente set fotográfico:



Figura 51: Casa dañada por motivos de la erosión del farellón (vista centralizada).
(Fuente: Elaboración Propia).



Figura 52: Vista general de una de las zonas dañadas en la playa.
(Fuente: Elaboración Propia).

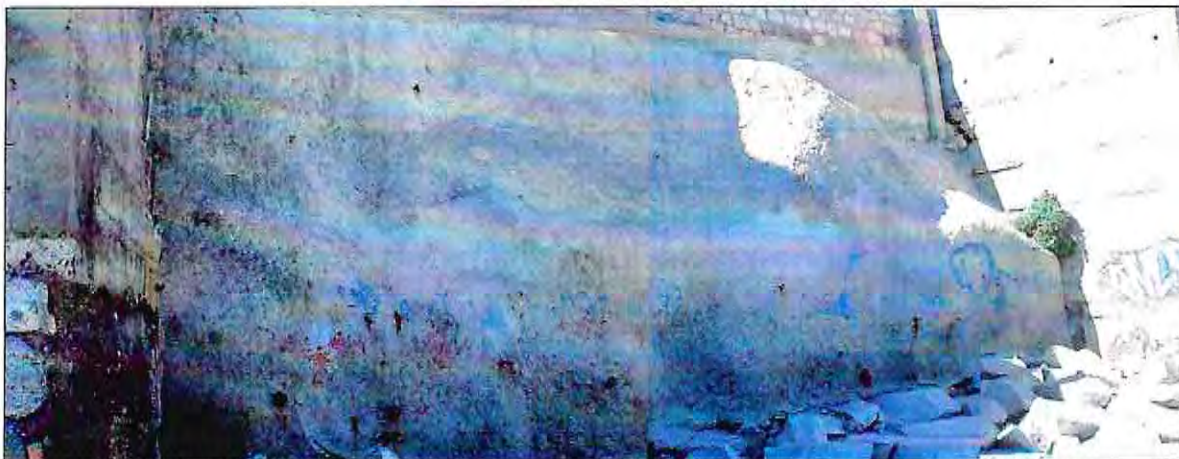


Figura 53: Vista panorámica de una de las zonas con protección de los taludes.
(Fuente: Elaboración Propia).



Figura 54: Protección de fondo construida al pie del talud.
(Fuente: Elaboración Propia).

De manera complementaria a la evolución histórica, en el Anexo IV se han adjuntado recortes de diarios de la época.

Considerando la información histórica expuesta recientemente se presume como posible causa del proceso erosivo, la desaparición y extracción de las comunidades algales presentes en la zona de estudio.



5.2 EVOLUCIÓN EN PLANTA



5.2.1 BASE DE DATOS

Para realizar el análisis fotográfico se dispone de un set de aerofotografías de Playa El Papagayo de diversos años, las cuales se resumen en la Tabla 19. Para ninguna de las fotos se conoce la hora y día exacto de la toma, por lo tanto son inciertos los instantes de mareas para los cuales fueron tomadas.

Tabla 22: Fotografías áreas disponibles.

(Fuente: Elaboración Propia).

	
Año: 1970 (Agosto)	Año: 1975 (Agosto)
Escala: 1:30.000	Escala: 1:36.000
Fuente: SHOA	Fuente: SHOA

	
<p>Año: 1980 (Junio) Escala: 1:30.000 Fuente: SAF</p>	<p>Año: 1994 (Noviembre) Escala: 1:20.000 Fuente: SAF</p>

(continuación Tabla 19)



(continuación Tabla 19)

5.2.2 ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE COSTA

(a) COMPARACIÓN HISTÓRICA

En la determinación el estado de equilibrio a lo largo del tiempo se procede a comparar las líneas de costas para cada uno de los años en los cuales se dispone de fotografías aéreas.

En las figuras 55 y 56 se muestran los resultados obtenidos de la comparación de las fotografías desde 1970 hasta 1980.

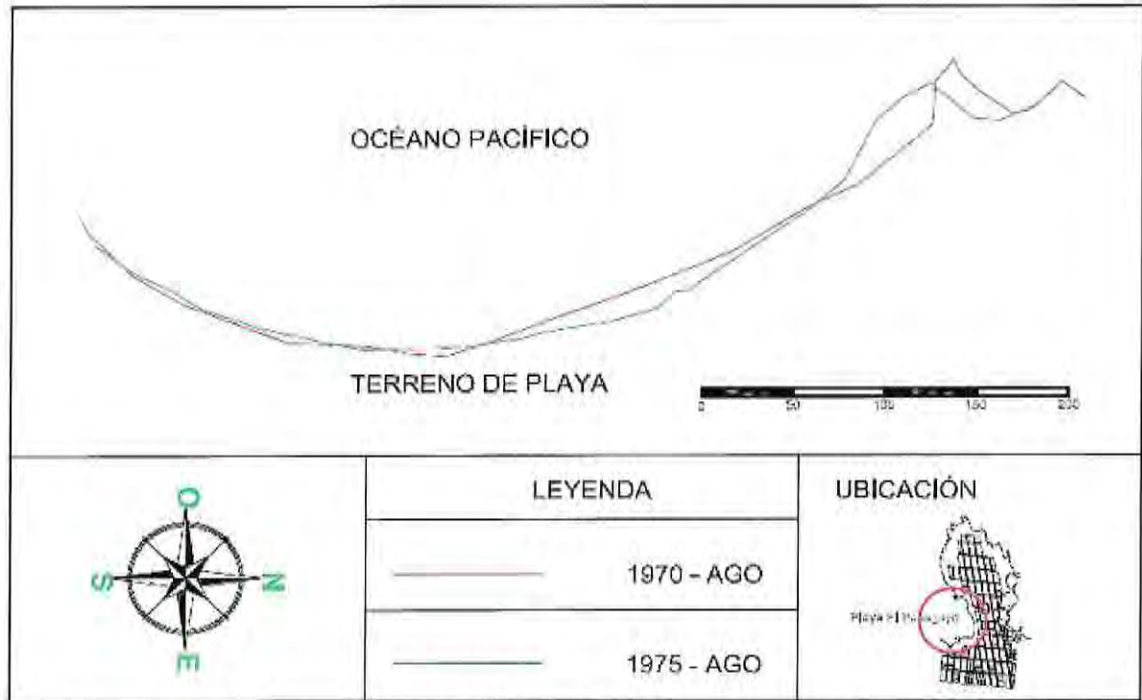


Figura 55: Comparación de la línea de costa de los años 1970 y 1975.
(Fuente: Elaboración Propia).

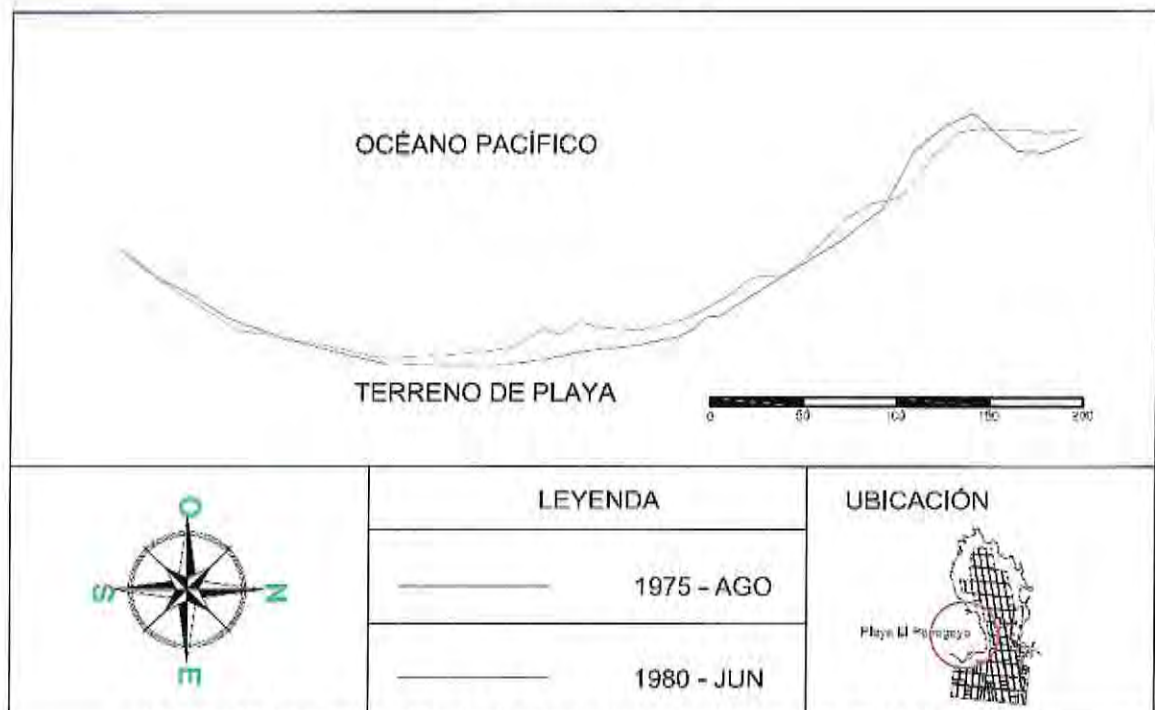


Figura 56: Comparación de la línea de costa de los años 1975 y 1980.
(Fuente: Elaboración Propia).

Entre los años 1970 al 1980, las líneas de costas no sufren grandes variaciones manteniéndose en un aparente estado de equilibrio. Solamente en comparaciones puntuales en este intervalo de tiempo se aprecian diferencias.

Las condiciones de oleaje para los meses en que fueron tomadas ambas fotografías aéreas indican que en Junio (fecha correspondiente a la toma de la foto de 1980) y Julio hay presencia de olas de mayor altura respecto de las de Agosto (fecha de la fotografía de 1975), pero con bajas frecuencias de aparición, tal como lo muestra el Gráfico 17. Por lo tanto entre Junio y Agosto hay oleaje energético de invierno, el que hace que retroceda la línea de costa.

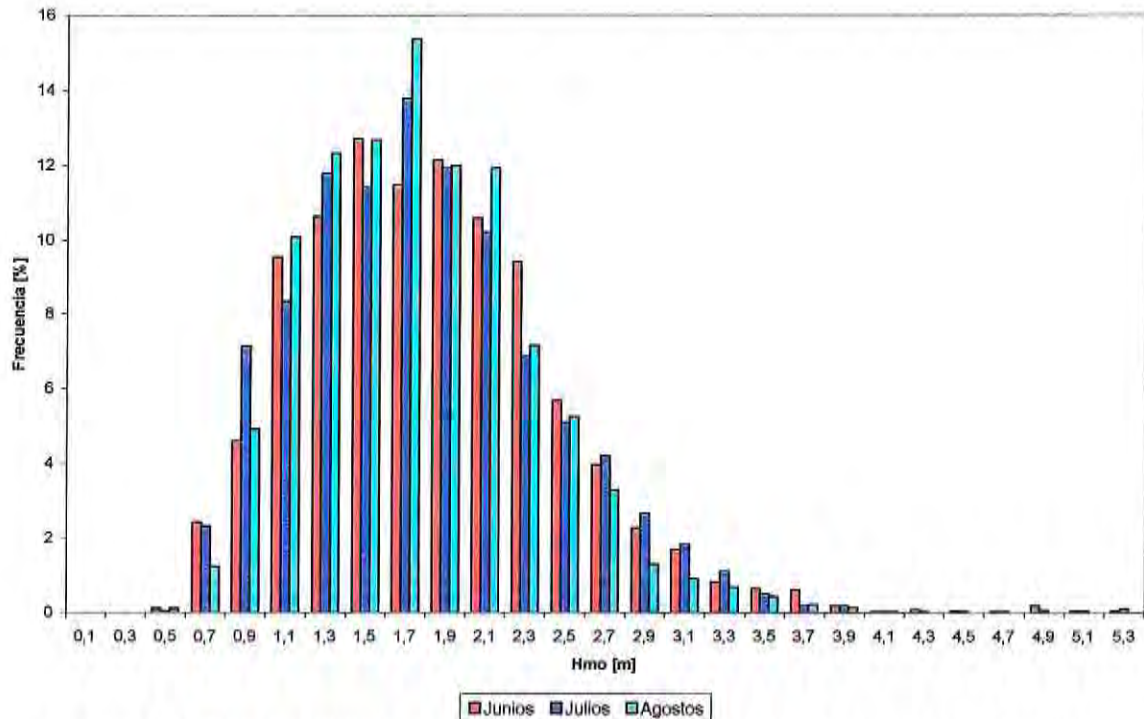


Gráfico 17: Comparación de Hmo para los meses entre Junio y Agosto, en el sitio.
(Fuente: Elaboración Propia).

La altura de ola más frecuente en el mes de Junio es de 1,5 metros, mientras que para Agosto es de 1,7 metros. Esta pequeña diferencia de altura de ola podría ser la causa de la diferencia de la línea de costa entre los dos años analizados.

Respecto de las direcciones de incidencia del oleaje el comportamiento para ambos meses no presenta variaciones en el rango de aparición, sólo en las frecuencias (ver Gráfico 18).

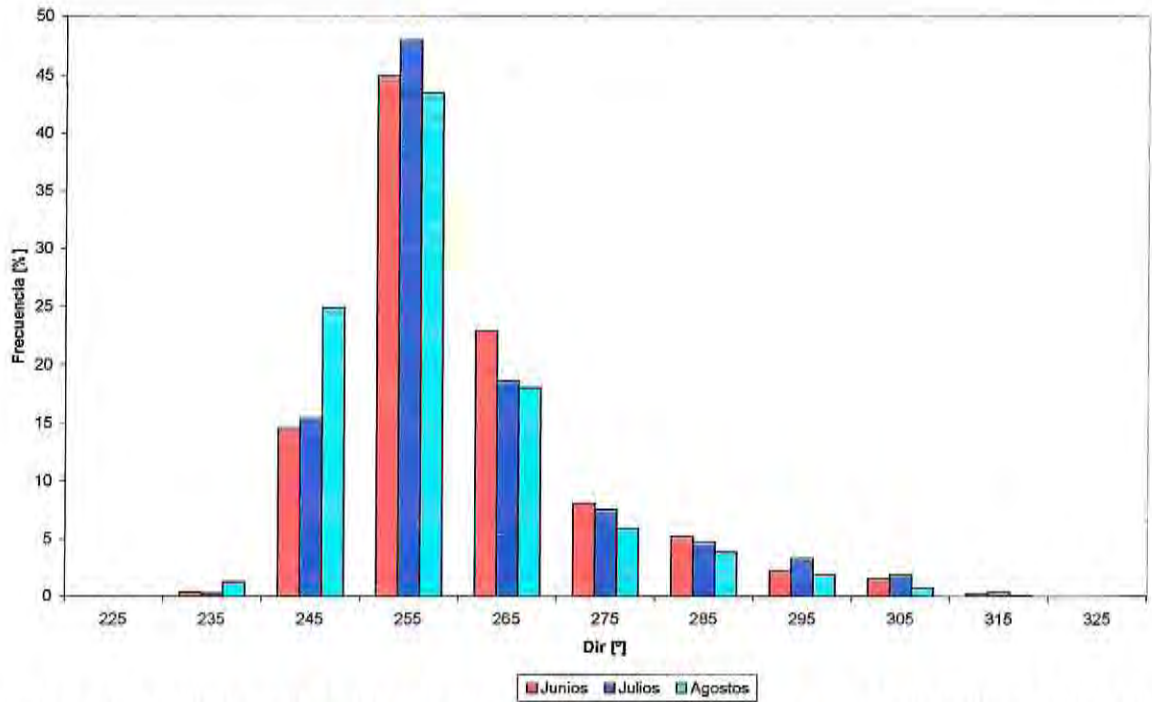


Gráfico 18: Comparación de direcciones de incidencia para los meses entre Junio y Agosto.
(Fuente: Elaboración Propia).

En vista de los resultados obtenidos, se puede suponer que la Playa El Papagayo se mantuvo en equilibrio entre el año 1970 y 1980 presentando pequeñas variaciones estacionales.

Al comparar la evolución de la línea de costa a partir del año 1980 hasta el 2006, se aprecian los resultados mostrados en las figuras 57 y 58.

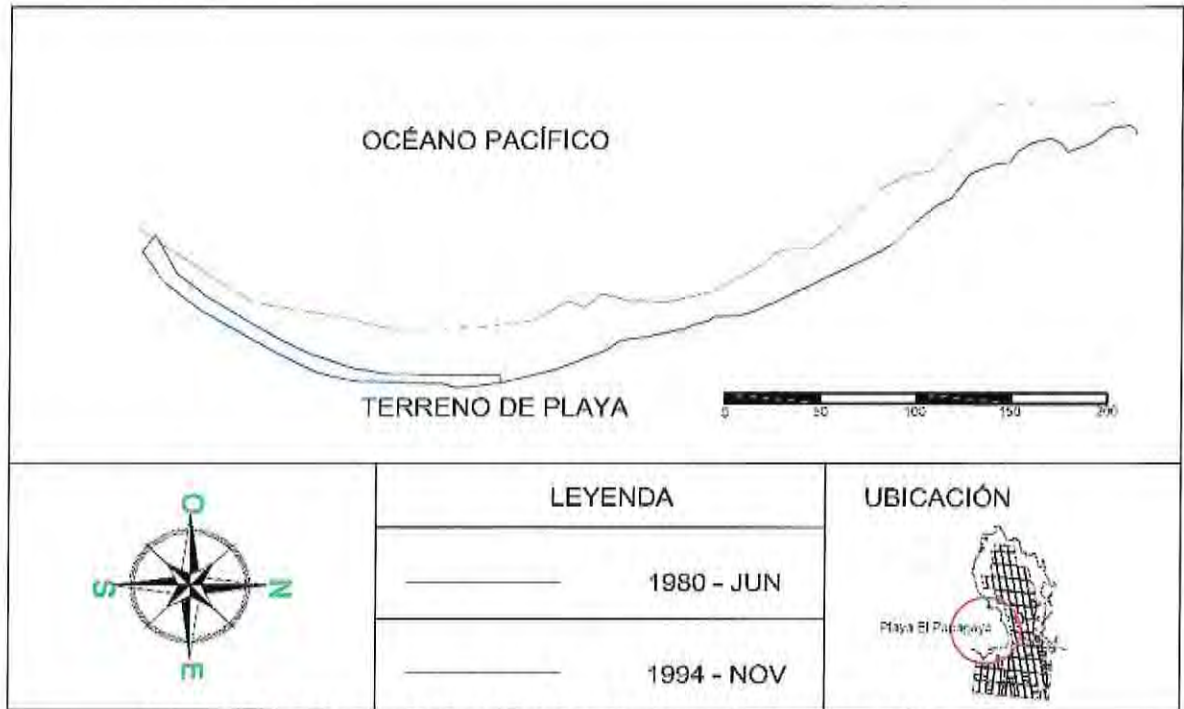


Figura 57: Comparación de la línea de costa de los años 1980 y 1994.
(Fuente: Elaboración Propia).

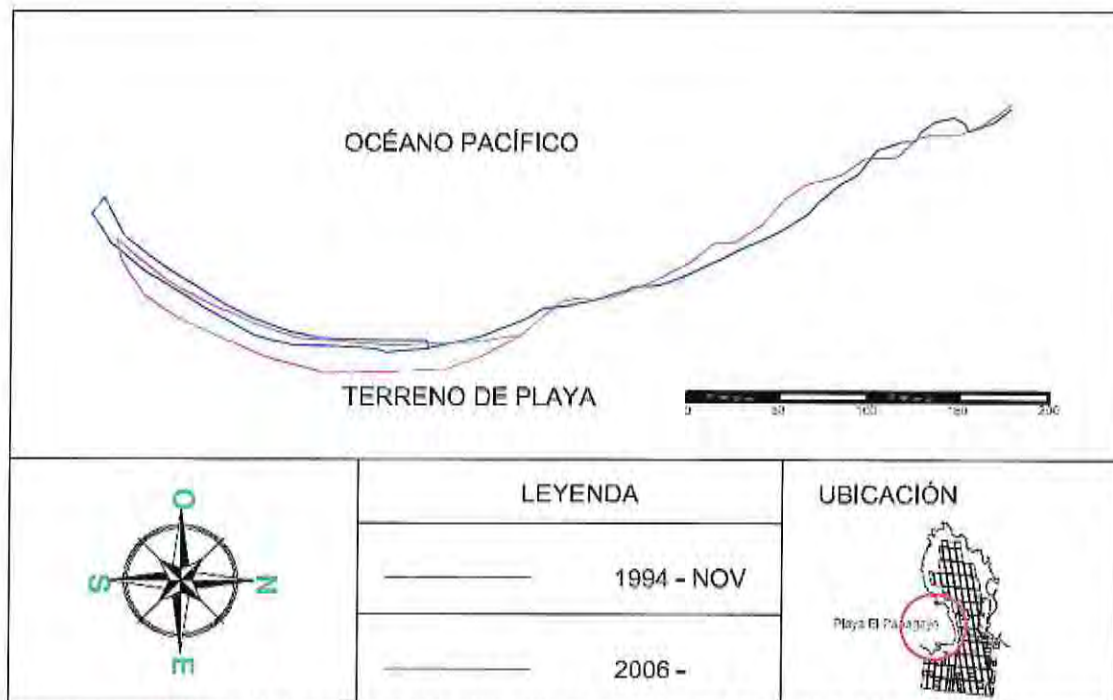


Figura 58: Comparación de la línea de costa de los años 1994 y 2006.
(Fuente: Elaboración Propia).

Entre el año 1980 y 1994 se advierte un gran retroceso de la línea de costa, además de la incorporación al sistema de la protección de escollera al pie del talud. Entre el año 1994 al 2006 se aprecia un nuevo estado aparente de equilibrio de la forma en planta de la playa.

Al comparar las condiciones de oleaje presentes en el mes de Noviembre para toda la estadística disponible con Junio, se aprecia que la altura de oleaje más frecuente es de $H_{mo} = 1,7$ m para Noviembre mientras que $H_{mo} = 1,5$ para Junio (ver Gráfico 19). Por otro lado, las alturas de oleaje en Noviembre de 1994 se presentan en el Gráfico 20, mientras que las condiciones de oleaje de Junio de 1980 no están disponibles, ya que la base de datos cubre a partir de 1985.

En el año 1994 el mes de noviembre presentó una altura de ola más frecuente de 1,9 metros, siendo esta 20 centímetros más que los noviembreros normales de la base de datos de 20 años. Sin embargo, la formación de la planta de equilibrio de una playa es un fenómeno de característica de mediano a largo plazo, por lo tanto esta variación no sería relevante en la condición de equilibrio.

Claramente entre 1980 y 1994 se rompe el equilibrio en planta de la playa y de acuerdo a lo mostrado en la Figura 57, las proporciones de las pérdidas de arena no son plenamente asociables a la variación estacional de la altura de ola que sólo asciende a 20 centímetros, sino que factores externos a la playa actuaron como agentes erosionadores.

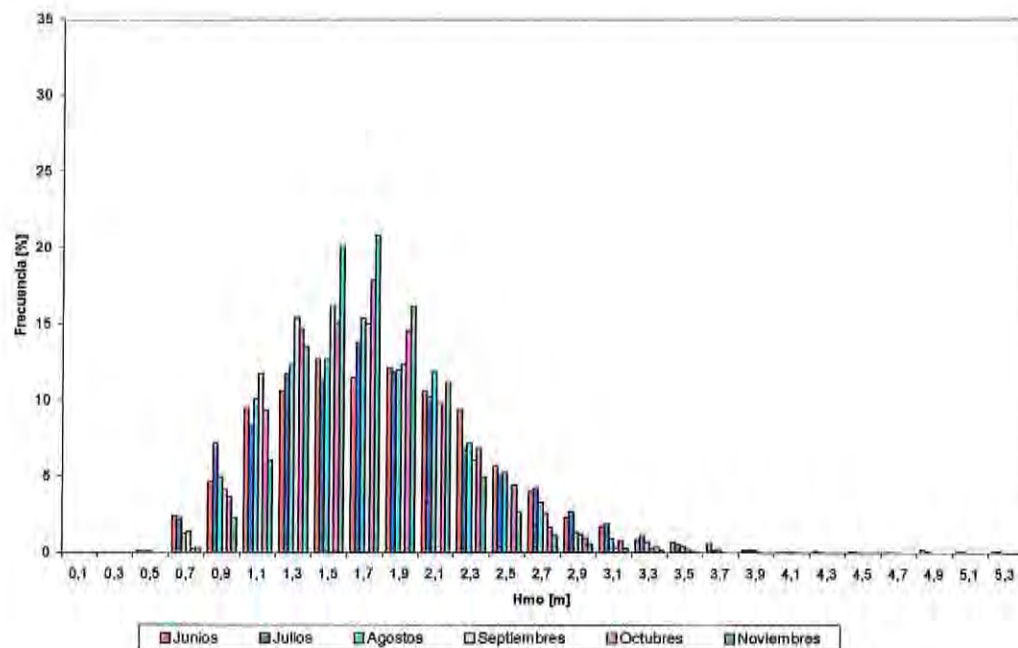


Gráfico 19: Comparación de Hmo entre Junio y Noviembre.

(Fuente: Elaboración Propia).

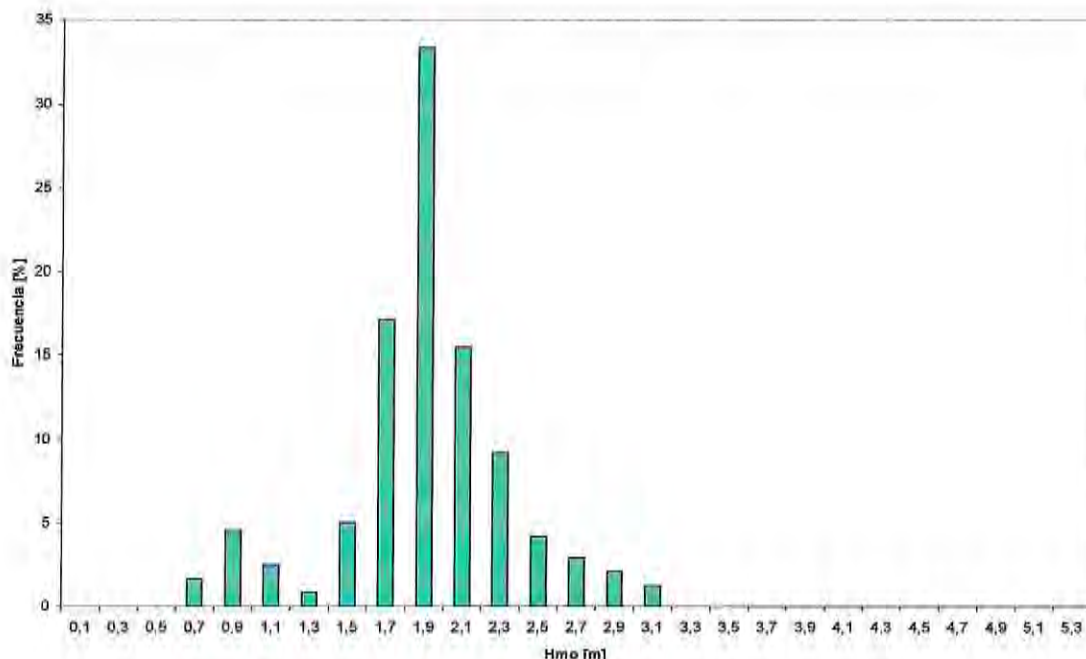


Gráfico 20: Frecuencia de aparición de Hmo para Noviembre de 1994.
(Fuente: Elaboración Propia).

En vista de los resultados obtenidos y considerando los hitos que han afectado a lo largo del tiempo a la Playa El Papagayo, el diagnóstico histórico planteado es válido. Por lo tanto, el problema de erosión costera que afecta a la zona de estudio se debe en gran parte a la extracción y desaparición de las comunidades algales.

(b) PLANTEAMIENTO DE LA FORMULACIÓN DE EQUILIBRIO

Basándose en las condiciones de equilibrio en planta entre el año 1970 a 1980, se evaluó la aplicación de la formulación de *HSU et al. (1992)* (ecuación 90) para playas encajadas, considerando diversos puntos de control los cuales no brindaron resultados adecuados a la realidad observada. Esto puede deberse a que la formulación de *HSU* no incluye el efecto de algas de fondo.

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left(\frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left(\frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad \text{Ecuación 89}$$

Ante ello se calculó la línea de costa promedio representativa y en ésta se seleccionaron dos puntos de control de acuerdo a la incidencia del oleaje para una estadística de 20 años (ver Figura 59), a modo de plantear una ecuación particular de equilibrio para la Playa El Papagayo.

Esta ecuación de equilibrio se obtiene en base a la metodología clásica propuesta por *HSU et al. (1992)* modificando los coeficientes de ajuste (C_0 , C_1 y C_2) y sus resultados se presentan en el Gráfico 21.

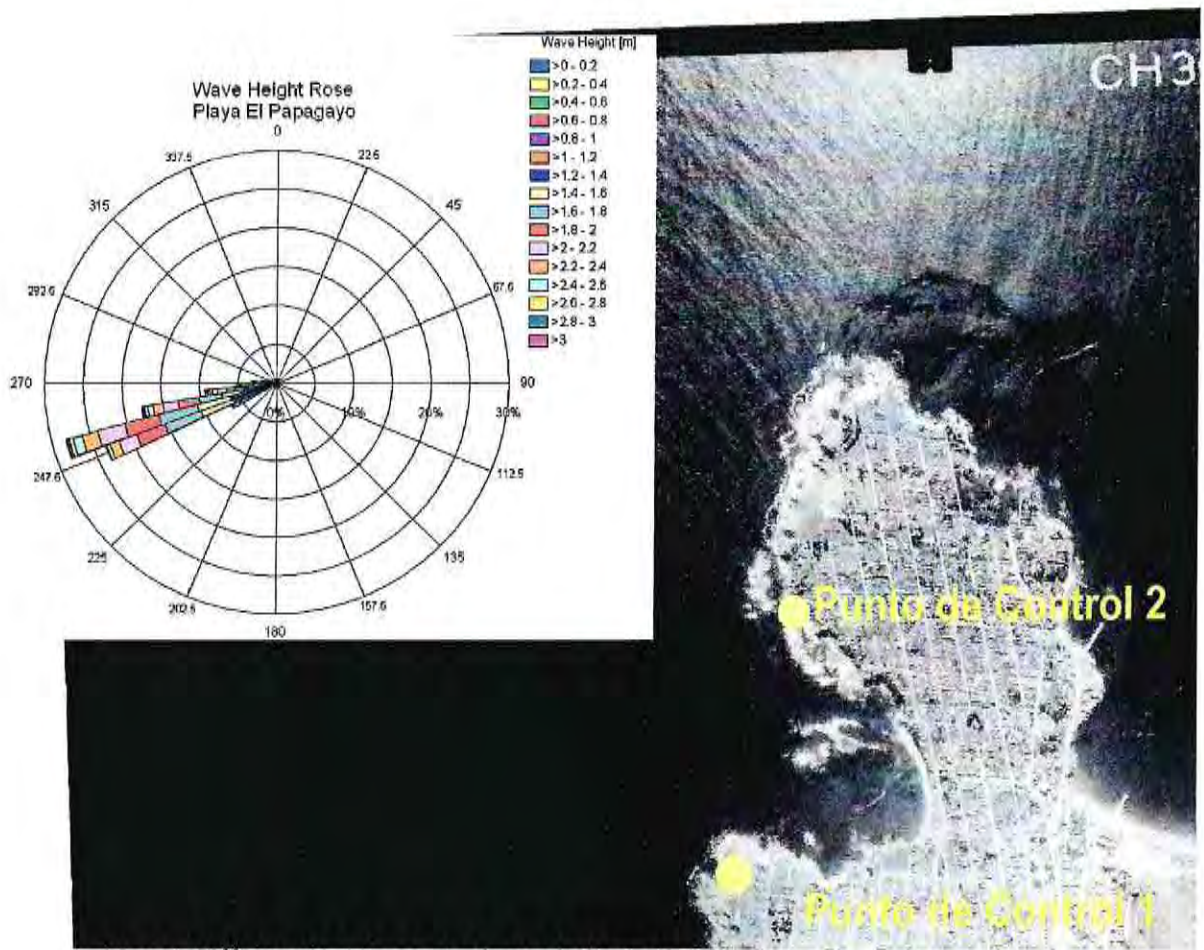


Figura 59²⁰: Puntos de control para la formulación de la planta de equilibrio.
(Fuente: Elaboración Propia).

²⁰ Los puntos de control también suelen llamarse polos de difracción, de acuerdo a la literatura que se consulte.

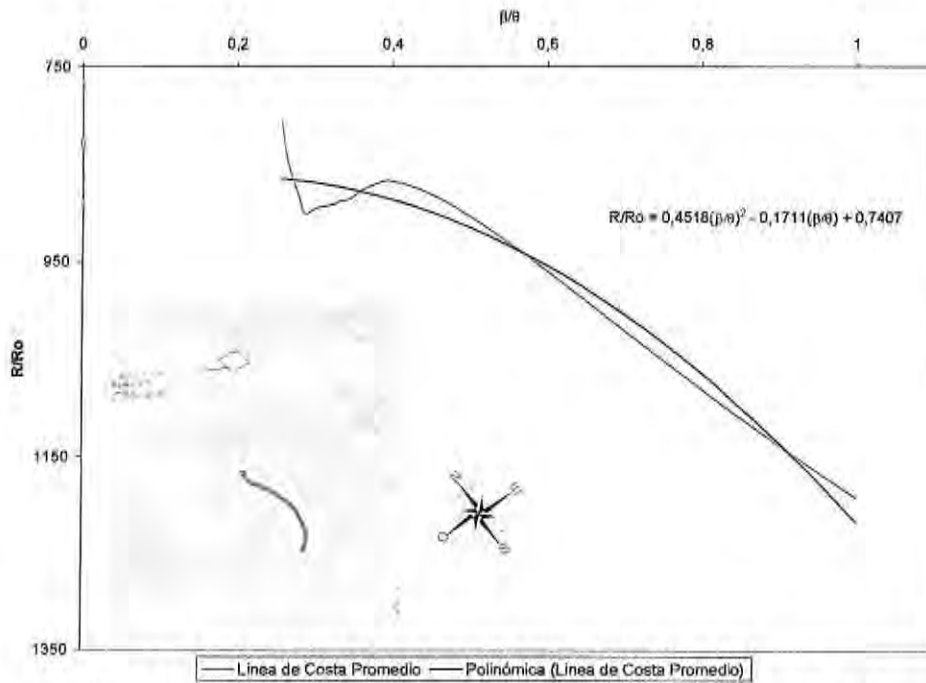


Gráfico 21: Obtención de la parábola de equilibrio para Playa El Papagayo.
(Fuente: Elaboración Propia).

Finalmente la ecuación de equilibrio en planta para Playa El Papagayo (parábola PPY-MQL) queda determinada por:

$$\frac{R}{R_0} = 0,7407 - 0,1711\left(\frac{\beta}{\theta}\right) + 0,4518\left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2 \quad \text{Ecuación 90}$$

5.3 ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE EROSIONADA

Debido a que no se cuenta con un levantamiento batimétrico previo al inicio del proceso erosivo, es imposible cuantificar del volumen erosionado en Playa El Papagayo. Sin embargo, la determinación del retroceso de la línea de costa se puede estimar la pérdida de superficie disponible como terreno de playa. De acuerdo a los resultados obtenidos previamente, la condición de equilibrio se mantiene hasta 1980, por lo cual la línea de costa de este año se considerará como el estado inicial. De este modo comparándola con la situación presente el año 1994 se determina que la superficie erosionada asciende a 13.964 m² de terreno de playa (ver Figura 60), los cuales se han perdido en el lapso de 15 años aproximadamente, es decir, El Papagayo a perdido terreno a una tasa de 931 m²/año.

Respecto del retroceso de la línea de costa entre los años 1980 y 1994, se determinó que el valor promedio es de 30 metros, teniendo un máximo y un mínimo de 44 y 4 metros respectivamente, dando como resultado una tasa promedio de retroceso de 2 m/año aproximadamente.

Sí se compara la tasa real de erosión con las formulaciones para determinar el transporte de sedimentos previamente empleadas (ver Gráfico 22) considerando las condiciones granulométricas equivalentes para la playa (PPY – EQ), se puede concluir que la ecuación de *Bagnold (1981)* aplicada mediante los métodos de gabinete es la de mejor ajuste, ya que se mantiene dentro del orden de magnitud del área erosionada. Mientras que las demás sobreestiman las condiciones reales, de acuerdo a lo mostrado en la Tabla 23.

Tabla 23: Comparación de resultados considerando la muestra PPY – EQ.
 (Fuente: Elaboración Propia).

Método	Tasa [m ³ /año/m]
Área Erosionada	931
Bagnol (1981)	483
Leo van Rijn (1986)	138.488
Queen's (1990)	21.000.002
Modelo – Bailard (1981)	386.141
Modelo – Leo van Rijn (1998)	392.614

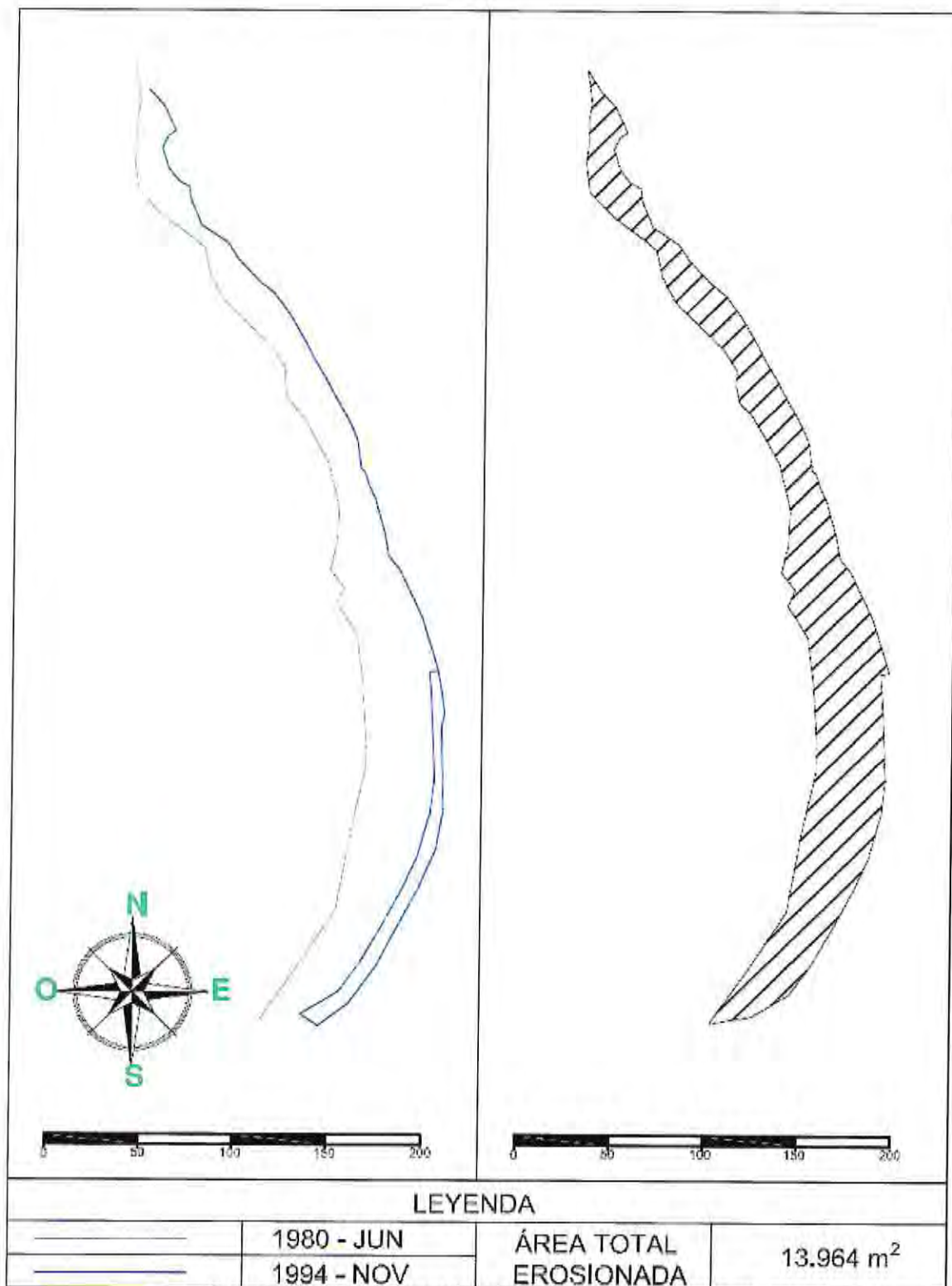


Figura 60: Determinación de la superficie erosionada.

(Fuente: Elaboración Propia).

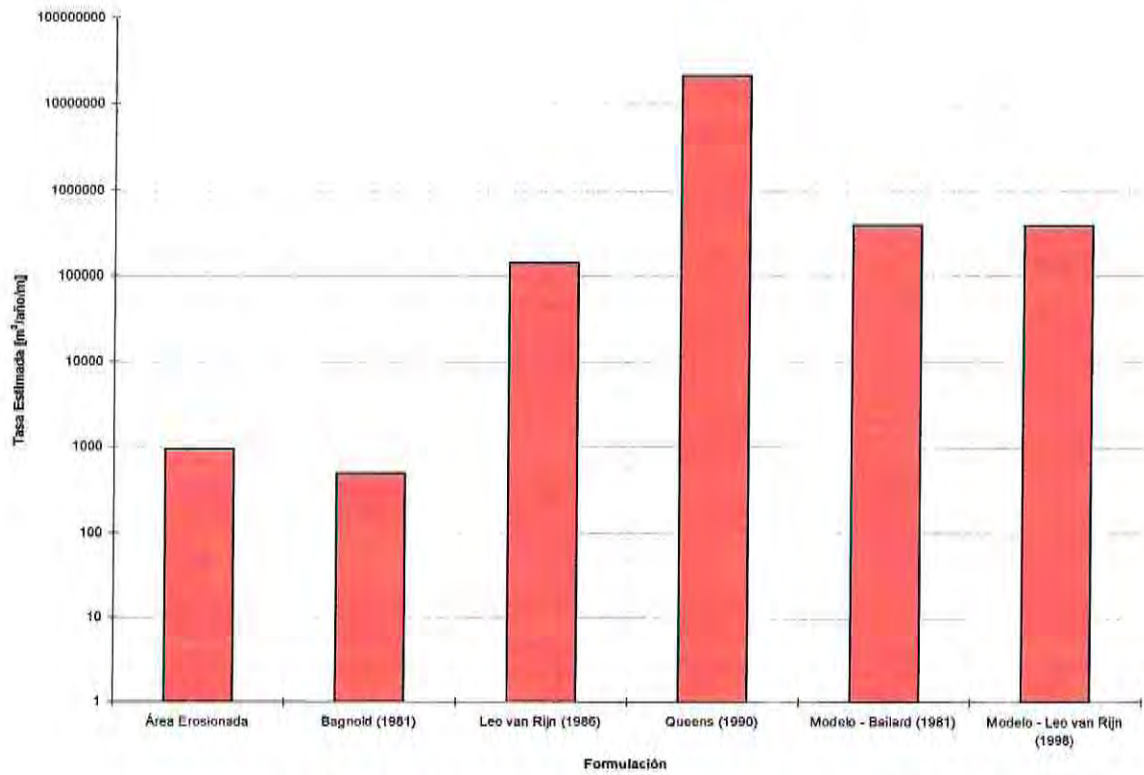


Gráfico 22²¹: Comparación de los resultados.
(Fuente: Elaboración Propia).

²¹ La tasa estimada se ha trazado en escala logarítmica.

6 REGENERACIÓN DE PLAYA EL PAPAGAYO

6.1 PRESENTACIÓN

El problema erosivo presente en Playa El Papagayo ha quedado en evidencia debido a los estudios realizados recientemente y si bien la construcción de la protección de escollera al pie del talud no es una solución estéticamente aceptable, ha cumplido su función impidiendo el continuo retroceso de la línea de costa y brindar protección a las construcciones en la cima del acantilado.

Basándose en experiencias internacionales y nuevas tendencias en ingeniería, a continuación se proponen cuatro alternativas de solución para la regeneración de espacios litorales.

6.1.1 DEFINICIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

(a) ALTERNATIVA 1: DIQUE SUMERGIDO CON ELEMENTOS REEF BALL²²

Los Reef Ball son elementos de hormigón diseñados especialmente para la protección contra la erosión costera y además permiten un desarrollo de la flora marina, ya que posee perforaciones ubicadas de manera aleatoria en su geometría (ver Figura 61).



Figura 61: Elemento Reef Ball.
(Fuente: www.reefball.org)

La tipología estructural adoptada para la alternativa 1 es mostrada en la Figura 62 y ha sido planteada de acuerdo a los ensayos realizados por *Lee Harris* (Ref. 12, 13 y 14) en modelos físicos para probar la estabilidad y transmisión de cada elemento.

²² Esta tecnología fue desarrollada por *Lee E. Harris, Ph.D., P.E.*

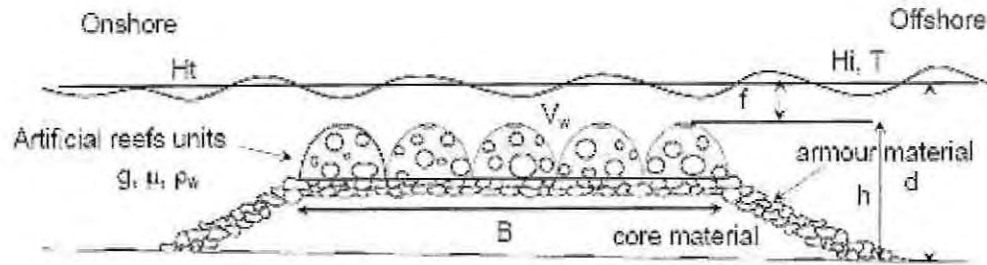


Figura 62: Sección tipo, alternativa 1.

(Fuente: Ref. 1).

La utilización de Reef Ball como elementos de protección ha sido implementada en diversos casos a lo largo de las costas del Atlántico, siendo uno de los proyectos más conocidos el de República Dominicana, el cual contó con la participación directa de *Lee Harris*, obteniéndose buenos resultados (ver Figura 63).



Figura 63: Caso de estudio en Republicada Dominica, antes y después de Reef Ball.

(Fuente: Ref. 13).

(b) ALTERNATIVA 2: DIQUE SUMERGIDO

Esta alternativa consiste en la implementación de un dique sumergido (de baja cota), compuesto de coraza y filtro, además de un apoyo al pie de la obra. Su funcionamiento se basa en permitir la transmisión, disminuyendo la altura de ola generando un rompimiento selectivo, ya que actúa como filtro de señales (algunas pasan y otras rompen). Al estar formado por coraza y filtro, la transmisión a través de la sección es mucho menor comparada con el sobrepaso. Sin embargo, su dimensionamiento se calculará para obtener condiciones de oleaje detrás del dique de bajas magnitudes.

La tipología estructural adoptada para al alternativa de solución 2 se muestra en la Figura 64.

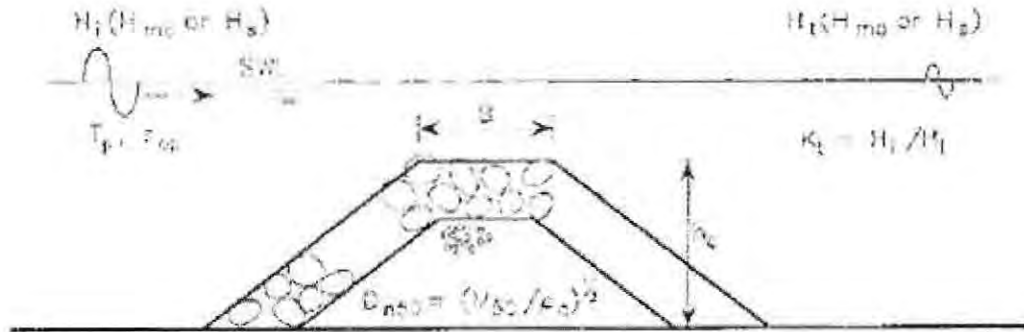


Figura 64: Sección tipo, alternativa 2.
(Fuente: Ref. 7).

Unos de los casos internacionales de aplicación de los diques sumergidos es el proyecto realizado en las Islas Amwaj en Bahrain, consistente en la generación de una serie de islas y playas artificiales, donde se utilizaron diques sumergidos convencionales (ver Figura 65).

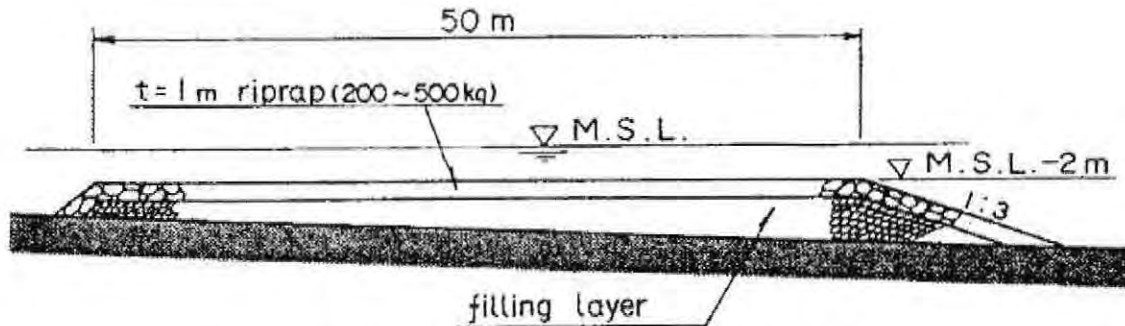


Figura 65: Sección utilizada en el Proyecto Islas Amwaj.
(Fuente: Ref. 24).

(c) ALTERNATIVA 3: DIQUE ARRECIFE

Los diques arrecifes son estructuras ampliamente utilizadas para el abrigo parcial de la costa ante problemas de erosión y en aquellos casos donde no se requiera de una protección total de la acción del oleaje. Generalmente se aplican para conseguir, entre otras, las siguientes finalidades:

- Ajuste y modificación del transporte de sedimentos.
- Regeneración, creación o estabilización de una playa.
- Protección contra la erosión.

Su funcionamiento hidrodinámico se basa en permitir la transmisión del oleaje disminuyendo su altura, mientras que estructuralmente se diseña para la deformación controlada de la sección alcanzando en el tiempo un perfil de equilibrio del arrecife. Su construcción es llevada a cabo mediante una acumulación de elementos de escollera de tamaños uniformes y generalmente son instalados en zonas de bajas profundidades y con amplitudes de mareas moderadas.

Una de las aplicaciones destacadas es la realizada en el Puerto Gris (Grays Harbor) de Washington (EEUU), utilizando un dique arrecife de 450 m de largo como contención de

sedimentos para evitar el embancamiento en la entrada al puerto. La sección tipo utilizada y la ubicación se ilustran en las Figuras 67 y 68 respectivamente.

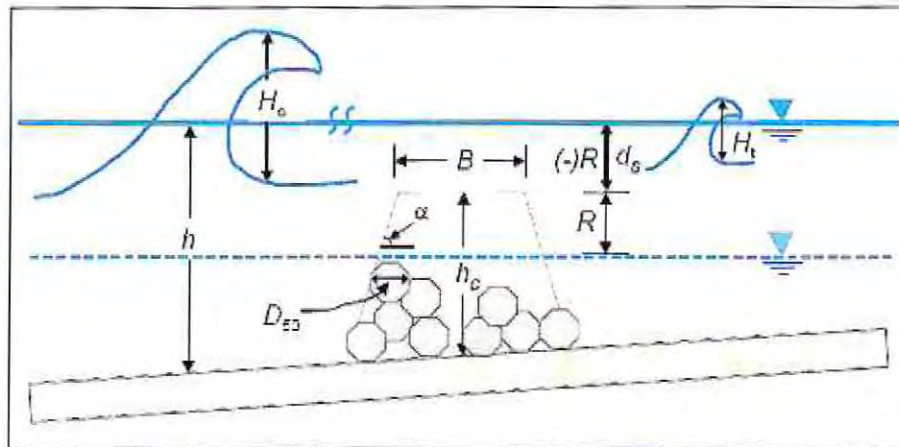


Figura 66: Sección empleada en Puerto Gris.

(Fuente: Ref. 18).

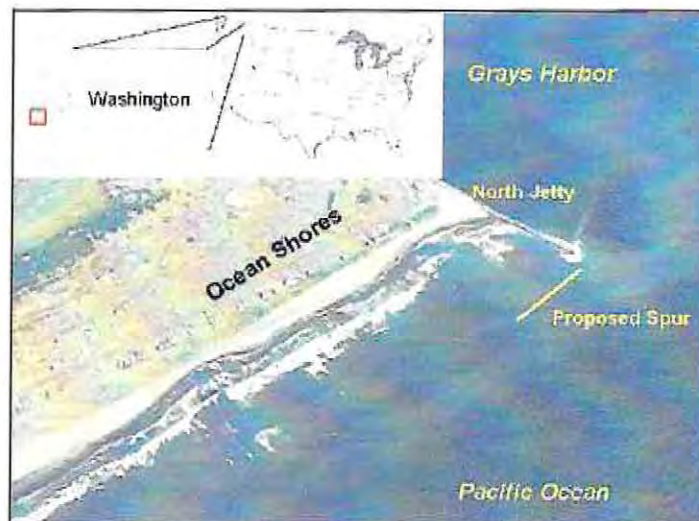


Figura 67: Ubicación de instalación del dique arrecife en Puerto Gris.

(Fuente: Ref. 18).

La tipología estructural adoptada para la alternativa 3 se ilustra en la Figura 68 y consiste en un dique arrecife dinámicamente estable, es decir, se deforma de manera controlada y sigue manteniendo su utilidad.

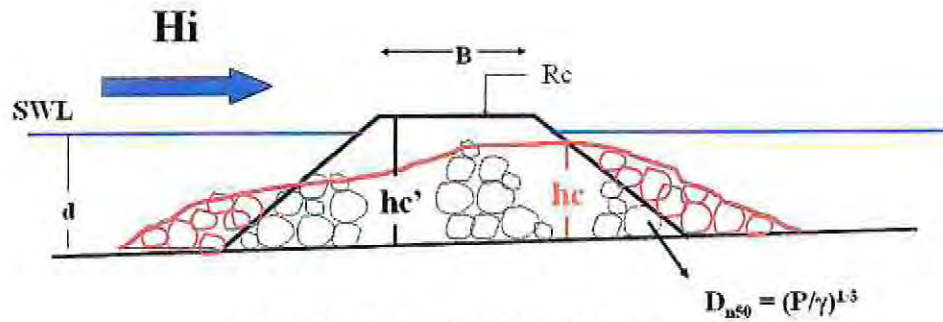


Figura 68: Sección tipo, alternativa 3.
(Fuente: Ref. 32).

(d) **ALTERNATIVA 4: PLAYA DE PIEDRAS**

Las playas de piedra se encuentran comúnmente en las riveras de lagos, donde predominan los grandes tamaños de sedimentos dados por los bolones y gravas gruesas (diámetro medio entre 6.4 y 25.6 centímetros). Su funcionamiento hidrodinámico es diferente al de las playas de arena, ya que debido al gran tamaño de su grano dificulta el desplazamiento, manteniéndose en su sitio debido al propio peso, siendo escasamente erosionados. El sur de Chile presenta en distintos puntos playas de este tipo, tal como se ilustra en la Figura 69.



Figura 69: Playa de piedras en el sur de Chile (X región).
(Fuente: Archivo Patricio Monárdez Santander).

6.1.2 RESULTADOS ESPERADOS

Si bien todas las alternativas planteadas están orientadas a la regeneración de Playa El Papagayo, la alternativa 4 se diferencia significativamente del resto. Esto se debe a que mediante la playa de piedras se busca la estabilización del perfil de equilibrio mediante el aumento drástico del tamaño medio del sedimento (D_{n50}), para que de acuerdo a las condiciones de oleaje existentes perdure en el tiempo brindando protección, así como también una zona de uso lúdico.

Las alternativas 1, 2 y 3 están orientadas a cambiar el régimen normal de oleaje, disipándolo sin rotura y transmitiéndolo con pequeñas alturas hacia la costa. Con esta transformación del oleaje se intentará establecer la condición natural de equilibrio de la playa, es decir, lograr el funcionamiento normal simulando la presencia de algas con estructuras artificiales. La implementación de cualquiera de los diques sumergidos proyectados cumplirán los siguientes objetivos:

- Modificar la profundidad de cierre de la Playa.
- Colgar un nuevo perfil de regeneración.

La profundidad de fundación de las obras de protección se ha considerado en -5 m (NRS), debido a que en ese lugar se presenta un angostamiento de la batimetría, lo que genera una canalización de la ola incidente amplificando su altura. Además la isobata antes mencionada se ubica frente a la zona que actualmente cuenta con la protección de escollera (ver lámina 1). Para alcanzar el nuevo perfil de regeneración, se considerará el relleno artificial desde alguna zona de empréstito cercana²³.

En la evaluación de las alternativas se procederá en primera instancia a determinar la mejor tipología estructural de las obras de protección (alternativas 1, 2 y 3), para luego diseñar la playa de arena en conjunto con la playa de gravas, proponiendo de esta manera dos proyectos de solución desarrolladas a nivel de ingeniería de detalles.

Finalmente, se debe tener en cuenta que todas las alternativas de solución planteadas consideran la remoción de la protección de escollera al pie del talud.

²³ Se desarrolla en extenso este tema en el punto " 6.6"

6.2 BASES DE DISEÑO

6.2.1 VIDA ÚTIL

Considerando que se diseñarán estructuras de carácter general y que en caso de falla, el riesgo de pérdidas de vidas humanas es reducido. La vida útil mínima recomendada por las ROM (Ref. 21) es de $L_r = 25$ años, adoptándose este valor como parámetro de diseño.

Tabla 24: Vida útil mínima recomendada.

(Fuente: Ref. 21).

Tipo de obra o Instalación	Nivel de Seguridad Requerido		
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Infraestructura de carácter general	25	50	100
De carácter industrial específico	15	25	50

LEYENDA:

INFRAESTRUCTURA DE CARÁCTER GENERAL:
Obras de carácter general; no ligadas a la explotación de una instalación industrial o de un yacimiento concreto.

DE CARÁCTER INDUSTRIAL ESPECÍFICO:
Obras al servicio de una instalación industrial concreta o ligadas a la explotación de recursos o yacimientos de naturaleza transitoria (por ejemplo, puerto de servicio de una industria, cargadero de mineral afecto a un yacimiento concreto, plataforma de extracción de petróleo, ...).

NIVEL 1:
Obras e instalaciones de interés local o auxiliares.
Pequeño riesgo de pérdidas de vidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Obras de defensa y regeneración de costas, obras en puertos menores o deportivos, emisarios locales, pavimentos, instalaciones para manejo y manipulación de mercancías, edificaciones, ...).

NIVEL 2:
Obras e instalaciones de interés general.
Riesgo moderado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Obras en grandes puertos, emisarios de grandes ciudades, ...).

NIVEL 3:
Obras e instalaciones de protección contra inundaciones o de carácter supranacional.
Riesgo elevado de pérdidas humanas o daños medioambientales en caso de rotura.
(Defensa de núcleos urbanos o bienes industriales, ...).

6.2.2 RIESGO

Considerando que todas las alternativas de solución propuestas están conformadas por obras flexibles, existe un bajo riesgo de pérdida de vidas humanas ante la rotura y que la repercusión económica en caso de inutilización de la obra es alta dada la naturaleza de estas obras. El máximo riesgo admisible recomendado por la ROM (Ref. 21) es de $R = 25\%$.

Tabla 25: Riesgos máximos admisibles.

(Fuente: Ref. 21).

		Posibilidad de Pérdidas Humanas	
		Reducida	Esperable
Repercusión económica en caso de inutilización de la obra.	Baja	0,50	0,30
	Media	0,30	0,20
	Alta	0,25	0,15
Índice $r = \frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$			

		Posibilidad de Pérdidas Humanas	
		Reducida	Esperable
Repercusión económica en caso de inutilización de la obra.	Baja	0,20	0,15
	Media	0,15	0,10
	Alta	0,10	0,05
Índice $r = \frac{\text{Coste de pérdidas}}{\text{Inversión}}$			

b) **Riesgo de Destrucción Total**

Se adoptará como riesgo máximo admisible el de iniciación de averías o el de destrucción total según las características de deformabilidad y de posibilidad o facilidad de reparación de la estructura resistente.

Para obras rígidas o de rotura frágil sin posibilidad de reparación se adoptará el riesgo de destrucción total.

Para obras flexibles, semirígidas o de rotura en general reparable (daños menores que el nivel prefijado función del tipo estructural) se adoptará el riesgo de iniciación de averías. En este tipo de obras podrá adoptarse también el riesgo de destrucción total, definiendo para cada tipo estructural el nivel de daños aceptado como de destrucción total. La acción resultante se considerará como accidental.

LEYENDA:

- Posibilidad de Pérdidas Humanas
 - ✓ Reducida: Cuando no es esperable que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños.
 - ✓ Esperable: Cuando es previsible que se produzcan pérdidas humanas en caso de rotura o daños.
- Repercusión Económica en caso de Inutilización de la Obra

$$\text{Índice } r = \frac{\text{Coste de pérdidas directas o indirectas}}{\text{Inversión}}$$
 - Baja: $r \leq 5$
 - Media: $5 < r \leq 20$
 - Alta: $r > 20$

6.2.3 PERIODO DE RETORNO

En base al riesgo y vida útil adoptados para el diseño de las obras proyectadas, se tiene que el periodo de retorno calculado utilizando la ecuación 92 (Ref. 21) es de 86,90 años, tomándose como valor de diseño 100 años.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{Tr}\right)^{Lf} \approx 1 - e^{-\left(\frac{Lf}{Tr}\right)} \Rightarrow Tr = -\frac{Lf}{\ln(1-R)} \quad \text{Ecuación 91}$$

6.3 PARÁMETROS DE DISEÑO

6.3.1 NIVEL DE MAREA

Los niveles de diseño son tomados de acuerdo al estudio no armónico de mareas realizado en la caracterización del medio (ver Tabla 13) y la inclusión de los fenómenos meteorológicos de acuerdo a:

- Diseño de Obras Protección: Se considerará la marea astronómica más las componentes meteorológicas. Pues se asume que las condiciones extremas no son significativas en la conformación de la forma en planta a largo plazo.
- Diseño de la Playa: Se considerará solamente la marea astronómica.

Se debe considerar que generalmente las formulaciones de diseño están referenciadas internacionalmente al Still Water Level (SWL) y para efectos de este estudio se hace equivalente al Nivel Medio del Mar de las costas chilenas.

6.3.2 OLEAJE

Para determinar la estabilidad estructural de las obras marítimas, se hace necesaria la estimación de las condiciones dominantes. Por lo tanto se desarrolló el análisis de clima extremo separando la estadística por cuadrante (3º y 4º) y posteriormente tomando los máximos anuales para 20 años de registro. Se ajustaron las distribuciones estadísticas de Weibull y Gumbel, mediante el método de la probabilidad de ploteo (función de Petruskas y Gringorten respectivamente). Concluyendo que Gumbel representa de mejor manera el régimen extremal de las alturas de ola, ya que su ajuste se correlaciona en mayor grado con los datos reales.

(a) CLIMA EXTREMO EN EL NODO 1

La distribución de Gumbel (ecuación 93) entrega la probabilidad de no excedencia y para obtener el valor de los parámetros A y B, se aplicó la función de Gringorten (ecuación 94). De este modo se obtuvo el ajuste Gumbel con una banda de confianza del 95% para cada una de la lista de tormentas analizadas por cuadrante (ver tablas 26 y 27).

$$P(h \leq H) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{H-B}{A}\right)\right)$$

Ecuación 92

$$P = 1 - \left(\frac{i - \alpha'}{N_T + \beta}\right)$$

Ecuación 93

Tabla 26: Lista de máximos anuales en 20 años de estadística, 3º Cuadrante.
(Fuente: Elaboración Propia).

DATA	Hrs	Hm0 [m]	Tp [s]	Dir [°]
26-05-1985	3:00	3,96	14,18	263
26-05-1985	6:00	3,96	14,25	262
19-05-1986	3:00	5,05	14,74	269
28-03-1987	12:00	3,25	12,71	263
15-08-1988	0:00	3,89	13,61	265
27-07-1989	6:00	3,72	11,46	270
30-03-1990	6:00	2,94	13,97	255
25-07-1991	12:00	3,33	15,76	256
22-08-1992	21:00	3,74	13,97	261
07-05-1993	18:00	3,51	13,77	258
07-05-1993	21:00	3,51	13,81	257
24-05-1994	18:00	4,19	12,9	269
14-08-1995	3:00	4,02	14,79	262
29-05-1996	0:00	3,53	13,67	265
21-06-1997	15:00	5,31	14,82	268
18-06-1998	6:00	3,44	13,1	257
01-07-1999	21:00	3,43	12,72	261
02-07-1999	0:00	3,43	12,67	261
15-06-2000	6:00	3,8	12,55	270
26-08-2001	18:00	3,24	10,27	270
10-10-2002	9:00	3,36	14,59	256
13-06-2003	15:00	3,86	15,42	266
23-06-2004	6:00	3,86	14,83	262

Tabla 27: Lista de máximos anuales en 20 años de estadística, 4º Cuadrante.
 (Fuente: Elaboración Propia).

DATA	Hrs	Hm0 [m]	Tp [s]	Dir [°]
25-05-1985	12:00	3,36	13,09	270
18-05-1986	21:00	4,75	14,66	270
25-07-1987	21:00	5,40	14,98	276
14-08-1988	12:00	3,72	13,33	271
26-07-1989	12:00	3,97	9,93	291
06-08-1990	15:00	3,29	12,94	287
06-08-1990	18:00	3,29	12,95	285
20-06-1991	0:00	2,89	10,96	271
06-06-1992	0:00	3,01	7,83	284
04-06-1993	0:00	3,67	13,15	278
24-05-1994	9:00	4,39	12,68	275
23-07-1995	0:00	3,47	12,35	288
12-06-1996	6:00	3,74	10,30	302
12-06-1996	9:00	3,74	10,40	299
21-06-1997	12:00	5,27	14,71	270
05-06-1998	18:00	3,10	8,74	297
27-05-1999	3:00	2,76	14,65	275
21-06-1999	6:00	2,76	13,48	270
07-09-1999	3:00	2,76	10,40	270
15-06-2000	6:00	3,80	12,55	270
30-07-2001	12:00	3,81	9,66	304
26-05-2002	9:00	3,15	10,40	299
22-05-2003	0:00	3,74	11,19	281
05-09-2004	12:00	3,53	12,56	274

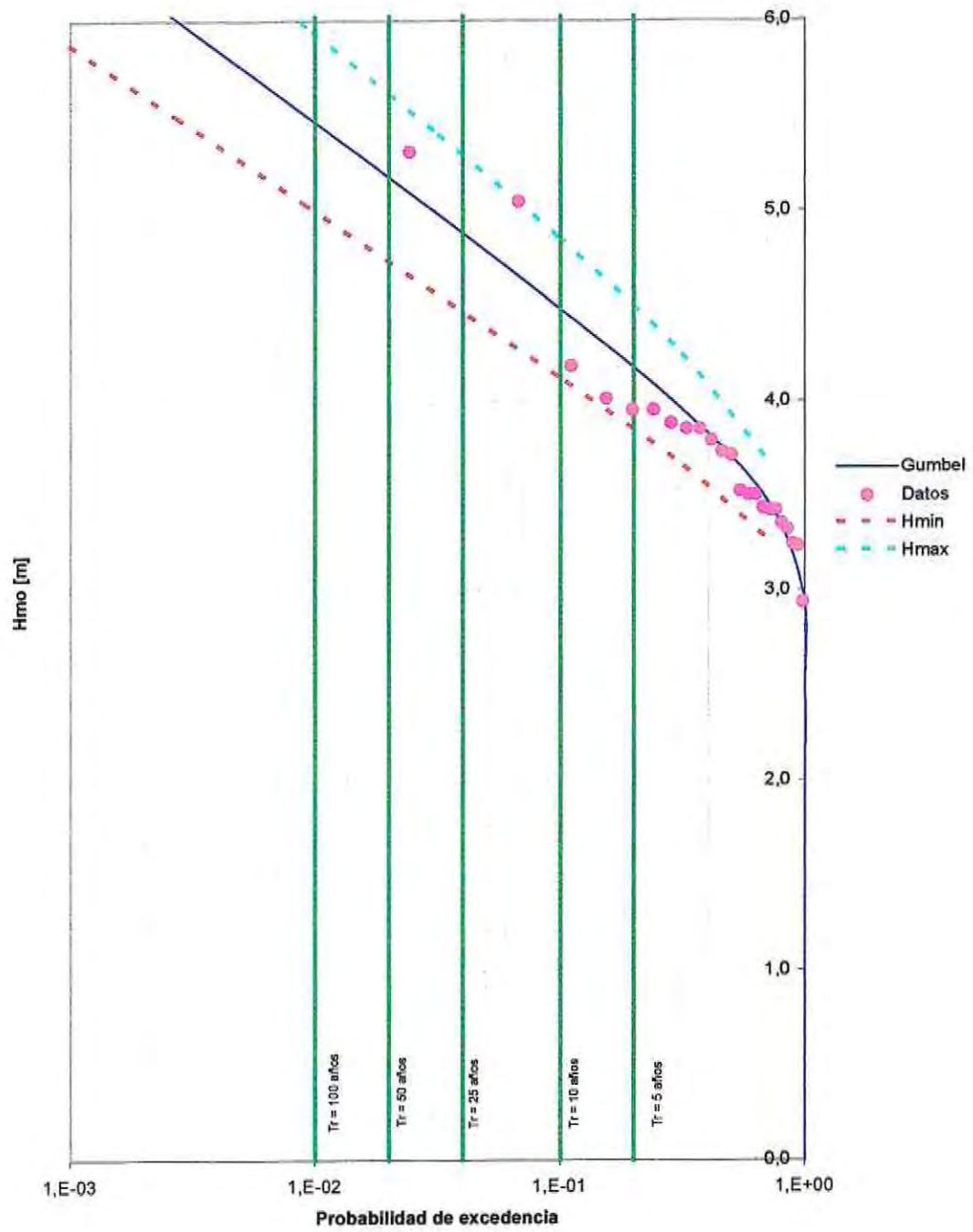


Gráfico 23: Régimen de oleaje extremo, 3º cuadrante. Playa El Papagayo.
(Fuente: Elaboración Propia).

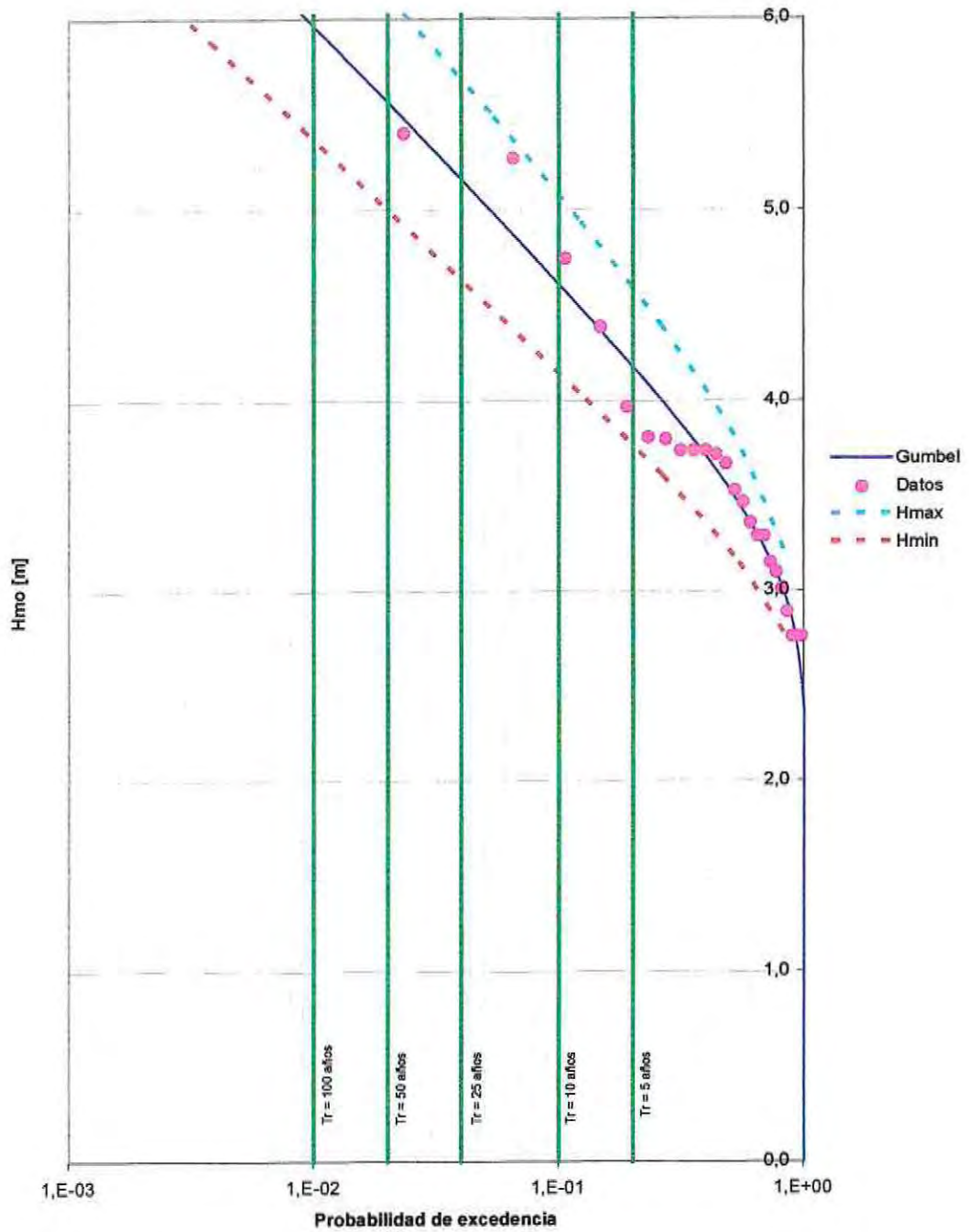


Gráfico 24: Régimen de oleaje extremo, 4º cuadrante. Playa El Papagayo.
(Fuente: Elaboración Propia).

(b) OLEAJE DE DISEÑO EN EL NODO 1

Considerando lo establecido en las bases de diseño, tanto las obras de protección como la playa deben calcularse para fenómenos de 100 años de periodo de retorno. De acuerdo a la ecuación 95, se asocia una probabilidad de excedencia.

$$P(h \leq H) = \frac{1}{\left(\frac{n^{\circ} \text{ datos}}{n^{\circ} \text{ años}}\right)^{T_R}} \quad \text{Ecuación 94}$$

Para la determinación de la altura de ola se emplea la ecuación linealizada de Gumbel (ecuación 96), considerando además un intervalo de confianza del 95%. Para la determinación del periodo y la dirección se considera el valor medio de cada una de las listas de máximos anuales correspondientes por cuadrante. Los valores de diseño de oleaje se resumen en la Tabla 28 advirtiéndose una mayor altura de ola para el 4º cuadrante.

$$H = B - A \ln(-\ln(1 - P(h \leq H))) \quad \text{Ecuación 95}$$

Donde A y B son los parámetros de la distribución gumbel.

Tabla 28: Oleaje de diseño en el punto de extracción por cuadrante.

(Fuente: Elaboración Propia).

	P(h ≤ H)	H _{min} (95%) [m]	H _{Diseño} [m]	H _{max} (95%) [m]	T _p [s]	Dir [°]
3º Cuadrante	0.0087	5.05	5.52	5.99	13.6	270
4º Cuadrante	0.0083	5.46	6.07	6.68	12.0	292

(c) OLEAJE AL PIE DE LA OBRA

Para determinar el oleaje al pie de la obra se evaluaron y compararon tres metodologías distintas, siendo ellas las siguientes:

- Formulación de *Goda (1978)*.
- Formulación de *Battjes (2000)*.
- Modelo numérico STWAVE

Goda 1978 es uno de los métodos clásicamente utilizados para la determinación de la altura de ola al pie de la obra, a pesar de que considera en la propagación solamente asomeramiento (Shoaling) y rotura. La deducción de esta metodología se obtuvo en base a las siguientes consideraciones:

- La distribución de olas incidentes se distribuyen de acuerdo a la función de probabilidad de Rayleigh.
- Las olas se propagan sobre una costa recta y paralela, contornos suaves y sin reflexión.
- El asomeramiento del tren de ondas es aproximadamente igual al de una sola ola.

Como el método de *Goda (1978)* considera la distribución del tipo Rayleigh, el inicio de la propagación debe ser desde aguas profundas.

Por otro lado, *Battjes (2000)* es el resultado de los ajustes de distribuciones estadísticas para oleaje en aguas someras. Se estima la altura de ola conociendo las condiciones en aguas profundas, pendiente del fondo y aplicando una normalización en base a parámetros que han sido validados. De acuerdo a la literatura técnica (Ref. 2) este modelo entrega resultados más exactos que las formulaciones actualmente existentes.

El método aplicado en STWAVE consiste en un doble paso, es decir, con las condiciones de diseño en el Nodo 1 (ver Figura 70), se retrocede hasta condiciones off shore (de acuerdo al periodo y dirección de la ola considerada) y posteriormente se lleva al Nodo 2, que coincide con el pie de la obra.

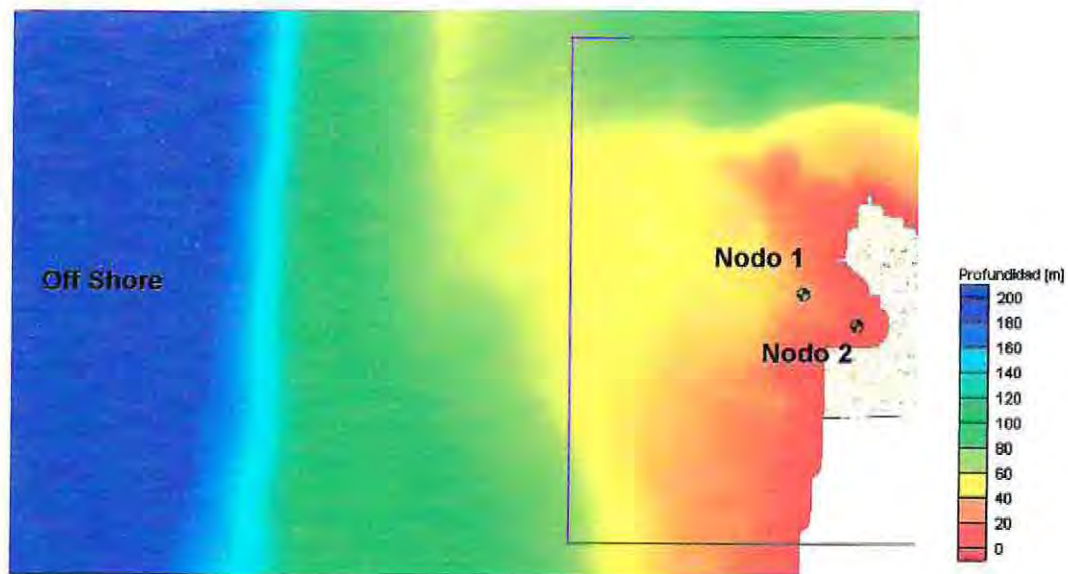


Figura 70: Ilustración de la metodología 3.

(Fuente: Elaboración Propia).

Los resultados obtenidos con cada uno de los métodos aplicados fueron contrastados con la altura rompiente en el punto, calculada de acuerdo al criterio de *Miche*²⁴ (1951) (ecuación 96) para oleaje irregular.

$$H_{mo,b} = 0.1L \tanh kd$$

Ecuación 96

²⁴ De acuerdo a lo descrito en la Ref. 25, este criterio predice las alturas rompientes de mejor manera (sólo 14% de desviación por sobre el valor real) que otros criterios clásicamente utilizados (McCowan 1981).

La altura rompiente constituye el límite físico de la ola de diseño, es decir, todas las olas que se encuentren sobre $H_{mo,b}$ al pie de la obra, no serán consideradas ya que no es posible encontrarlas en el lugar de emplazamiento de las futuras obras de protección.

Las condiciones de diseño al pie de la obra por cuadrante, de acuerdo a las metodologías previamente expuestas se resumen en los gráficos 23 y 24.

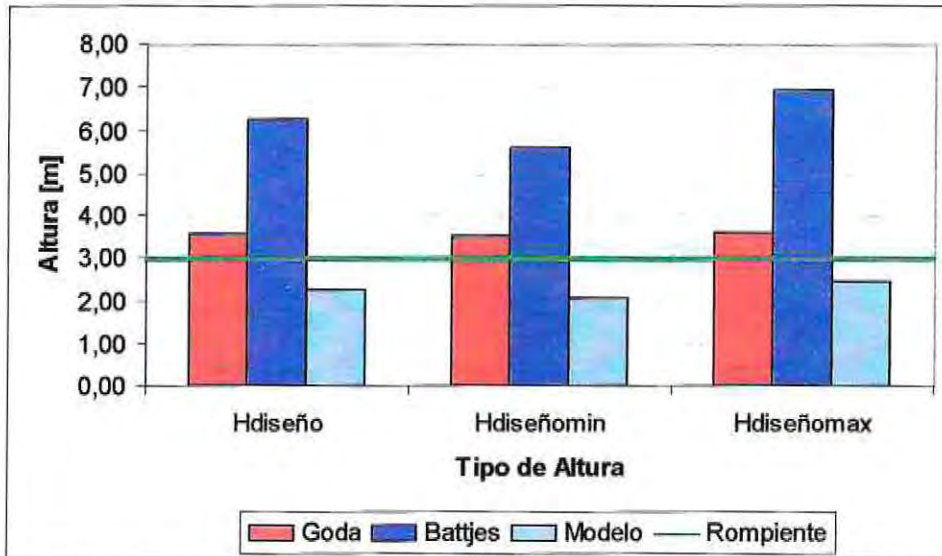


Gráfico 25: Comparación de olas al pie de la obra para el 3º cuadrante.
(Fuente: Elaboración Propia).

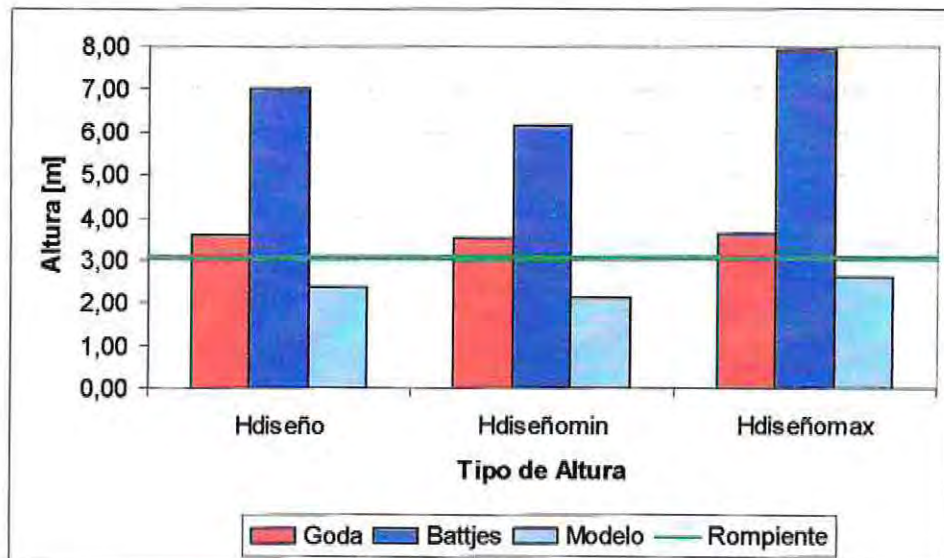


Gráfico 26: Comparación de olas al pie de la obra para el 4º cuadrante.
(Fuente: Elaboración Propia).

Nótese que para ambos cuadrantes el único método que no sobrepasa el límite de la rompiente es STWAVE, siendo descartadas las restantes metodologías debido a que sobreestiman las condiciones de oleaje. De esta manera la altura de ola para un periodo de retorno de 100 años por cuadrante corresponde a lo mostrado en la Tabla 29.

Tabla 29: Altura de ola progresiva para $T_r = 100$ años al pie de la obra.

(Fuente: Elaboración Propia).

	3º Cuadrante	4º Cuadrante
H [m]	2.27	2.37
T_p [s]	13.9	12.0
Dir [°]	293	289

Empleando un criterio conservador, se ha escogido como oleaje de diseño el proveniente desde el 4 cuadrante ya que posee una mayor altura.

6.3.3 HIDRODINÁMICA DEL PERFIL DE PLAYA

El perfil se divide en la zona litoral, la zona intermedia y la zona costa afuera (offshore). La primera está contenida en el tramo entre la línea de costa y la profundidad activa (d_1). La zona intermedia comprende desde la profundidad activa hasta la profundidad de cierre (d_L). Finalmente la zona offshore es aquella donde la tasa de transporte de sedimentos es poco significativa y puede considerarse igual a cero (ver Figura 71).

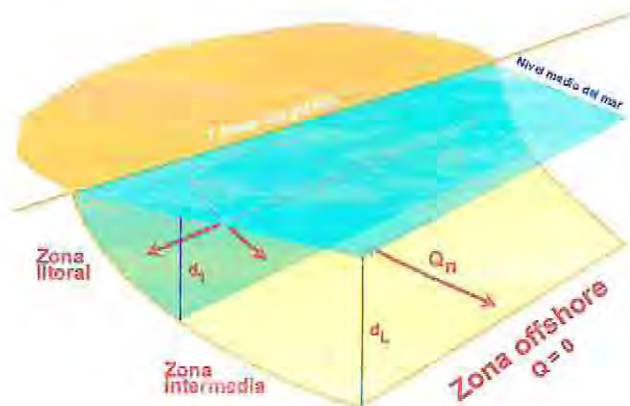


Figura 71: Zonas de un perfil de playa.

(Fuente: Archivo José María Medina).

Para la determinación de la profundidad activa (ecuación 98) y profundidad de cierre (ecuación 99) se emplean las formulaciones de *Birkermeier* (1985), la cual considera la altura de ola que sólo es superada 12 horas al año ($H_{s0.137}$), es decir, aquella que tiene una probabilidad de ocurrencia de aproximadamente 0.137%.

$$d_1 = 1,75H_{s0,137} - 57,9 \left(\frac{H_{s0,137}^2}{gT_s^2} \right) \quad \text{Ecuación 97}$$

$$d_L = 3,5H_{s0,137} \quad \text{Ecuación 98}$$

Donde T_s es el periodo de oleaje asociado a $H_{s0,137}$.

Del análisis de la tabla de incidencia se calculó $H_{s0,137}$ para cada uno de los cuadrantes de direcciones analizados, resumiendo sus resultados en la Tabla 30.

Tabla 30: $H_{s0,137}$ de acuerdo al cuadrante analizado, para 20 años de estadística (Nodo 1).

(Fuente: Elaboración Propia).

Cuadrante	$H_{s0,137}$ [m]	T_p [s]
3°	3,7	13
4°	3,3	13

(a) *CONDICIÓN ACTUAL*

Debido al oleaje $H_{s0,137}$ mostrado en la Tabla 30, el funcionamiento actual de la Playa El Papagayo está dado por la Tabla 31. Considerando la batimetría de la zona (ver lámina 1) la profundidad activa se encuentra aproximadamente a 480 metros de la línea de costa, mientras que la profundidad de cierre a unos 705 metros.

Tabla 31: Zonificación del perfil para la condición actual.

(Fuente: Elaboración Propia).

Cuadrante	Profundidad Activa [m NRS]	Profundidad de Cierre [m NRS]
3°	-6.00	-12.95
4°	-5.39	-11.55

(b) *CONDICION PROYECTADA*

Para lograr el cierre de la playa a los -5 metros (NRS), la altura de oleaje en el Nodo 1 (Figura 72) debe ser igual a 1.43 metros. Si está se lleva al pie de la obra utilizando el método de transferencia de oleaje basado en el modelo numérico STWAVE (ver sección 6.3.2), la altura de la ola en el Nodo 2 se obtiene a partir ecuación 100, donde K_1 y K_2 son los coeficientes de transferencia de acuerdo al periodo de oleaje.

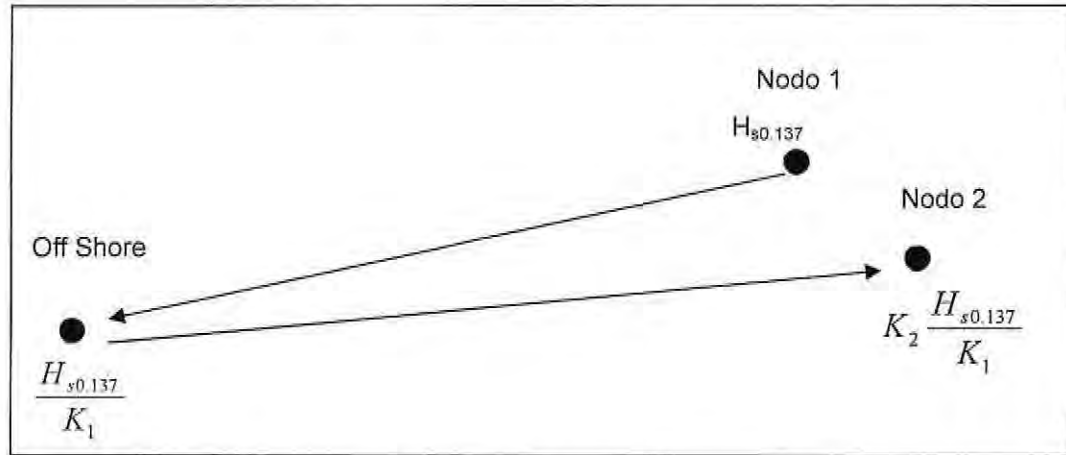


Figura 72²⁵: Esquema de cálculo de transformación del oleaje $H_{s0.137}$.
(Fuente: Elaboración Propia).

$$H_2 = \frac{K_2}{K_1} 1.43 \quad \text{Ecuación 99}$$

Por otro lado, la altura de oleaje $H_{s0.137}$ en el Nodo 2 debiera tener un valor de acuerdo al cuadrante (3° y 4° respectivamente) igual a:

$$H_2 = \frac{K_2}{K_1} 3.7 \quad \text{Para el tercer cuadrante.}$$

$$H_2 = \frac{K_2}{K_1} 3.3 \quad \text{Para el cuarto cuadrante.}$$

Las obras de protección deberán cumplir con la función de modificar el oleaje $H_{s0.137}$ en el Nodo 2 para lograr los objetivos planteados, es decir, transmitir la ola con una altura que cierre la playa a los -5 m (NRS). Por lo tanto, el coeficiente de transformación ($K_{\text{transformación}}$), se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$K_{\text{transformación}} = \frac{\frac{K_2}{K_1} 1.43}{\frac{K_2}{K_1} 3.7} \quad \text{Para el tercer cuadrante.}$$

$$K_{\text{transformación}} = \frac{\frac{K_2}{K_1} 1.43}{\frac{K_2}{K_1} 3.3} \quad \text{Para el cuarto cuadrante}$$

²⁵ La definición de nodos empleadas en esta figura es equivalente a lo mostrado en la Figura 70.

De este modo se han obtenido los coeficientes de transformación para cada cuadrante, los cuales se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32: Coeficientes de transformación del oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia).

Cuadrante	$K_{\text{transformación}}$
3°	0.39
4°	0.43

6.4 DESARROLLO DE LAS ALTERNATIVAS

6.4.1 FUNCIONAMIENTO HIDRODINÁMICO

En el diseño de las obras marítimas de protección, uno de los factores más importantes es su funcionamiento hidrodinámico, ya que si bien la determinación del peso de la roca o elemento artificial a utilizar brinda la estabilidad, la respuesta hidráulica es la que condiciona la utilización de la obra. En el caso de los diques sumergidos, la transmisión puede ser debido a sobrepaso o transmisión entre los poros del dique.

(a) ALTERNATIVA 1: DIQUE SUMERGIDO CON ELEMENTOS REEF BALL.

Armono & Hall (Ref. 1) proponen luego de ensayos en modelos físicos bidimensionales para oleaje irregular, una ecuación para la transmisión en diques sumergidos compuestos por elementos semiesféricos y con perforaciones (ecuación 100), basándose en los diseños realizados por *Reef Ball™*.

$$K_t = 1.616 - 31.322 \frac{H_i}{gT^2} - 1.099 \frac{h}{d} + 0.265 \frac{h}{B} \quad \text{Ecuación 100}$$

Donde:

- Hi: Altura de Ola Incidente [m].
- T: Periodo del oleaje incidente [s].
- g: Aceleración de gravedad [m/s²].
- h: Cota de coronamiento medida desde el fondo del mar [m].
- d: Profundidad de instalación del dique, respecto del SWL [m].
- B: Ancho de coronación del dique [m].

Se sensibilizó el coeficiente de transmisión para combinaciones del ancho y cota de coronamiento, obteniéndose los resultados ilustrados en el Gráfico 27. Cabe destacar que para todos los casos de cota de coronamiento, cuando el ancho (B) está entre 10 y 20 metros presenta la mayor variación del coeficiente de transmisión, el cual comienza a descender hasta llegar a los 30 metros y desde aquí en adelante mantiene un valor aproximadamente constante.

De acuerdo a los requerimientos de coeficiente de transmisión necesarios para cerrar la playa a los -5 m (NRS), la geometría óptima de esta tipología estructural sería con un ancho (B) y altura de coronamiento (h) de 20 y 5.8 metros, respectivamente. Obteniéndose un $K_t = 0.33$.

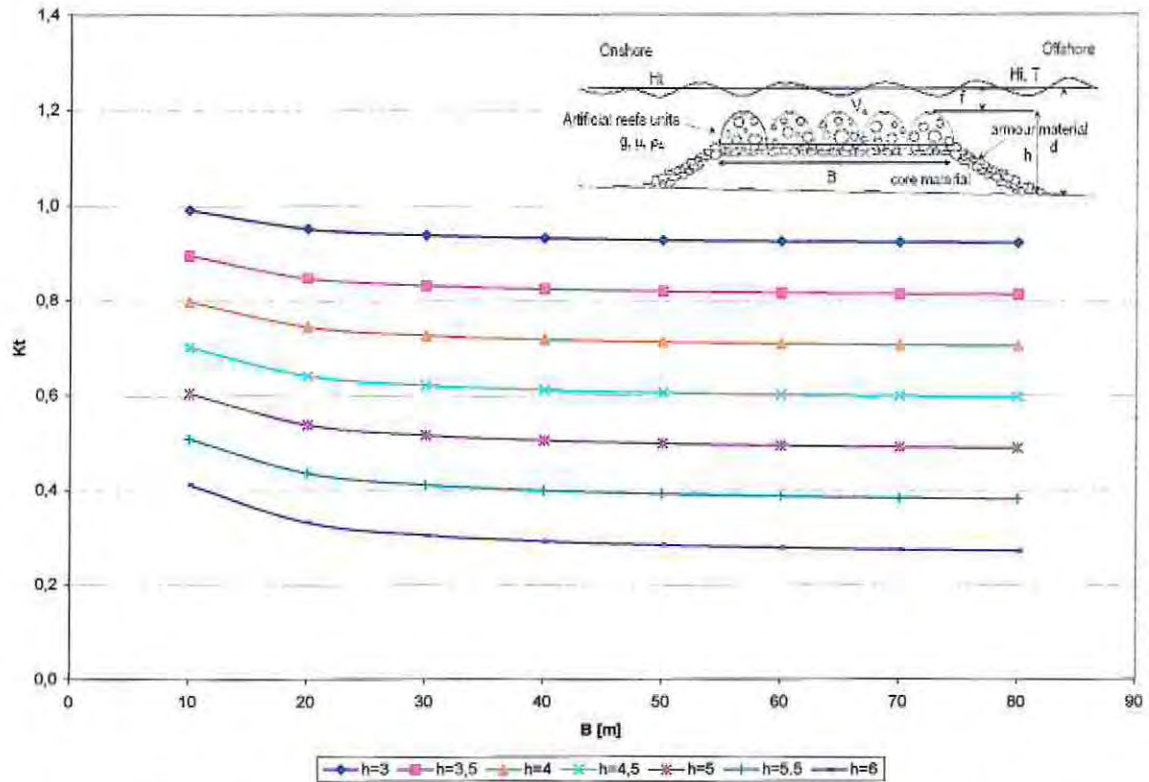


Gráfico 27: Coeficiente de transmisión de acuerdo al ancho (B) y a la altura (h), para la alternativa 1.

(Fuente: Elaboración Propia).

(b) ALTERNATIVA 2: DIQUE SUMERGIDO.

La transmisión para los diques sumergidos se evalúa de acuerdo a las ecuaciones propuestas por d'Angremond (et. al. 1996) (Ref. 32), aplicables para diques sumergidos compuestos de roca o de tetrápodos.

$$K_t = \begin{cases} -0.4 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.64 \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} \left(1 - e^{-0.5\xi} \right) & \frac{B}{H_{si}} < 10 \\ -0.35 \frac{R_c}{H_{si}} + 0.51 \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.65} \left(1 - e^{-0.41\xi} \right) & \frac{B}{H_{si}} > 10 \end{cases} \quad \text{Ecuación 101}$$

Donde:

- Rc: Franco Bordo (m). (Rc = d-h)
- d: Profundidad respecto del SWL (m).
- h: Altura de coronación (m)
- Hsi: Altura de Ola incidente (m).
- B: Ancho de coronamiento (m).
- ξ: Parámetro de Rompimiento.

De igual manera que para la alternativa 1, se sensibiliza la transmisión para distintas combinaciones del ancho y la altura de coronamiento (Gráfico 28), encontrándose similares resultados que el caso anterior.

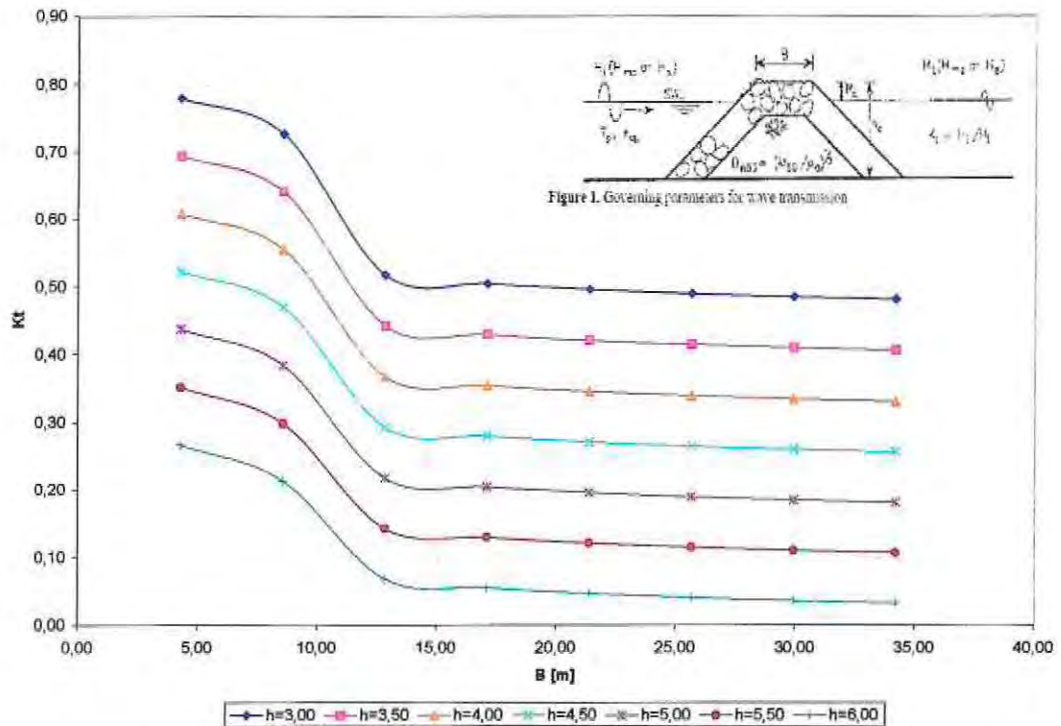


Gráfico 28: Coeficiente de transmisión de acuerdo al ancho (B) y a la altura (h), para la alternativa 2.

(Fuente: Elaboración Propia).

Para cumplir con los requerimientos de transmisión se ha escogido un set de 3 casos (Tabla 33) los cuales serán sensibilizados en el diseño.

Tabla 33: Casos de diques sumergidos a sensibilizar.
(Fuentes: Elaboración Propia).

Caso	B [m]	h [m]	Kt
1	18	5.0	0.39
2	24	4.5	0.30
3	28	4.0	0.37

(c) **ALTERNATIVA 3: DIQUE ARRECIFE**

De acuerdo a la metodología propuesta por *J.W. van der Meer (1990)* (Ref. 32) la transmisión para diques arrecifes viene dada por:

$$K_t = a \frac{R_c}{D_{n50}} + b \quad \text{Ecuación 102}$$

$$a = 0.031 \frac{H}{D_{n50}} - 0.24 \quad \text{Ecuación 103}$$

$$b = -5.42 \cdot s_{op} - 0.05 \frac{H}{D_{n50}} + 0.85 \quad \text{Ecuación 104}$$

$$s_{op} = \frac{2\pi H}{gT^2} \quad \text{Ecuación 105}$$

Donde:

- Rc: Francobordo del dique arrecife (m).
- D_{n50}: Diámetro medio de la roca a utilizar (m).
- H: Altura de Ola incidente (m).
- T: Periodo del oleaje (s).
- g: Aceleración de gravedad (m/s²).

En este caso la transmisión no depende directamente del ancho de coronamiento de la estructura, por lo que se ha sensibilizado para distintos tamaños de roca y franco bordo (ver Gráfico 29). La tendencia mostrada en este gráfico, indica que ante un menor tamaño de roca y mayor franco bordo la transmisión disminuye, esto se debe a que por un lado se minimiza el índice de poros y además se disminuye el sobrepaso.

Para obtener un coeficiente de transmisión de acuerdo a las exigencias de diseño (definidas en la sección 6.3), se debe considerar un tamaño de roca además cumpla con la estabilidad estructural del dique. Se proponen 3 casos para la sensibilización del diseño (ver Tabla 34).

Tabla 34: Casos de diques arrecifes a sensibilizar.
(Fuentes: Elaboración Propia).

Caso	D ₅₀ [m]	W ₅₀ [Kg]	h'c [m]	Kt
1	0.50	330	6.0	0.38
2	0.75	1150	6.5	0.36
3	0.82	1500	6.5	0.37

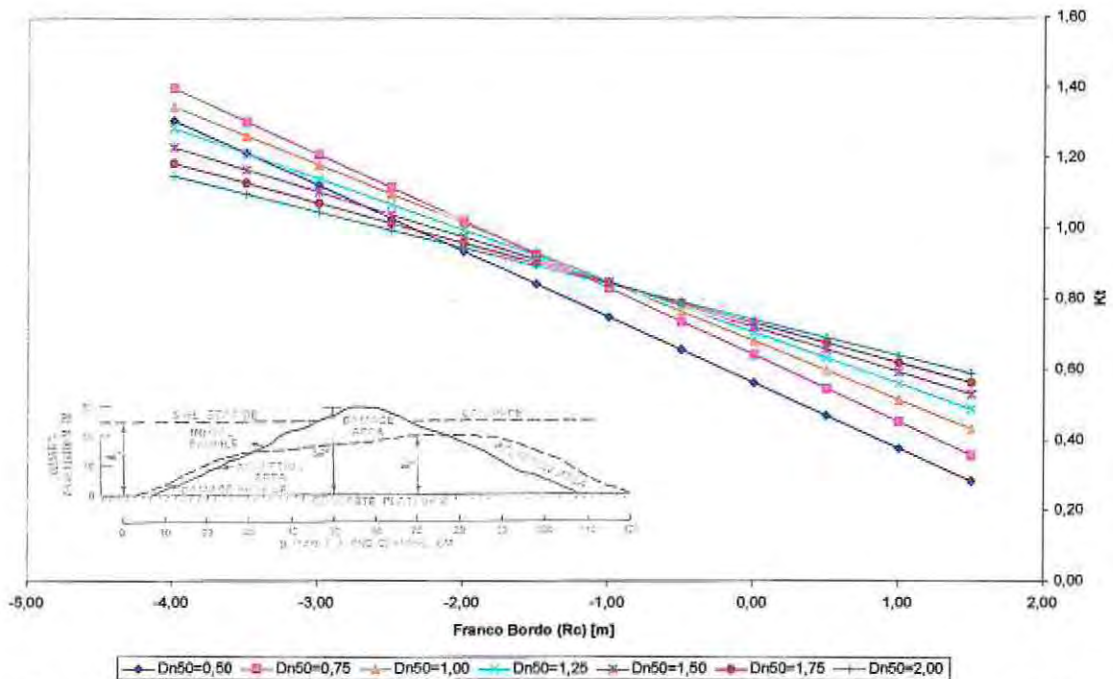


Gráfico 29: Coeficiente de transmisión de acuerdo al franco bordo (Rc), para distintos tamaños de rocas (D_{n50}), para la alternativa 3.
(Fuente: Elaboración Propia).

6.4.2 DISEÑO ESTRUCTURAL ELEMENTOS DE PROTECCIÓN

(a) ALTERNATIVA 1: DIQUE SUMERGIDO CON ELEMENTOS REEF BALL™.

Para el diseño de diques sumergidos con elementos Reef Ball, se deben diferenciar dos componentes principales, siendo uno de ellos la banquetta y el otro los elementos de coraza (Figura 62) que corresponden a los Reef Ball. De acuerdo a lo recomendado por Lee Harris (Ref. 12) estos

deben diseñarse para resistir el vuelco, ya que el deslizamiento es despreciable debido a sus perforaciones. Actualmente existen en el mercado los Reef Ball detallados en la Tabla 35.

Tabla 35: Características de Reef Ball disponibles en el mercado.

(Fuente: Ref. 14).

Tipo	Ancho [m]	Alto [m]	Peso [kg]	Volumen de Concreto [m ³]
GoliathBall	1,83	1,52	2700	1,00
SuperBall	1,83	1,37	2700	1,00
UltraBall	1,83	1,31	2000	0,70
ReefBall	1,83	1,22	1900	0,60
PalletBall	1,22	0,90	1000	0,25
BayBall	0,90	0,61	340	0,08
Mini-BayBall	0,76	0,53	90	0,05
Lo-ProBall	0,61	0,46	60	0,05
OysterBall	0,46	0,30	20	0,05

La fuerza total actuante en los Reef Ball se obtiene a partir de la multiplicación de un factor de seguridad²⁶ y la fuerza de la ola calculada con la ecuación de *Morison (1950)* integrada en la vertical. En el diseño se debe satisfacer:

$$W_{unidad} > F.S \cdot W_{requerido}$$

La banquetta se diseña mediante la fórmula propuesta por *J. W. van der Meer (1994)* para el diseño de diques sumergidos de acuerdo a un rango de aplicación definido por la proporción del franco bordo (R_c) y el diámetro de la roca (D_{n50}) utilizada. El intervalo esta definido por:

$$-3 \leq R_c/D_{n50} < 2$$

Y considera que es estable aquel elemento de escollera que cumpla con la siguiente condición:

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 0.06 \left(\frac{R_c}{D_{n50}} \right)^2 - 0.23 \frac{R_c}{D_{n50}} + 1.36 \quad \text{Ecuación 106}$$

Donde:

Hs: Altura de la ola de diseño (m).

Δ : Densidad relativa de los elementos de escollera y el agua de mar.

D_{n50} : Diámetro medio de la roca utilizada (Kg).

²⁶ Obtenido de acuerdo al tipo de rompiente desde la API RP -2ª, según recomendación de Lee Harris.

Rc: Franco bordo de la estructura (m).

Luego de aplicadas las formulaciones correspondientes, se concluye que este tipo de diques tienen problemas de estabilidad, ya que los elementos Reef Ball disponibles en el mercado (ver Tabla 35) no cumplen con los factores de seguridad recomendados (1,35 en este caso según la API RP -2A). Esto se debe a que las condiciones de abrigo de la bahía de El Papagayo son bajas y por lo tanto se tiene que:

$$W_{Requerido} > W_{Máximo Disponible}$$

(b) ALTERNATIVA 2: DIQUE SUMERGIDO.

Considerando la Figura 73, para el diseño del manto principal se empleará la ecuación 106, mientras que el filtro de la estructura se dimensiona de manera proporcional al peso del elemento de escollera de acuerdo a la Ecuación 107.

$$\frac{W_{coraza}}{5} \leq W_{filtro} \leq \frac{W_{coraza}}{10} \quad \text{Ecuación 107}$$

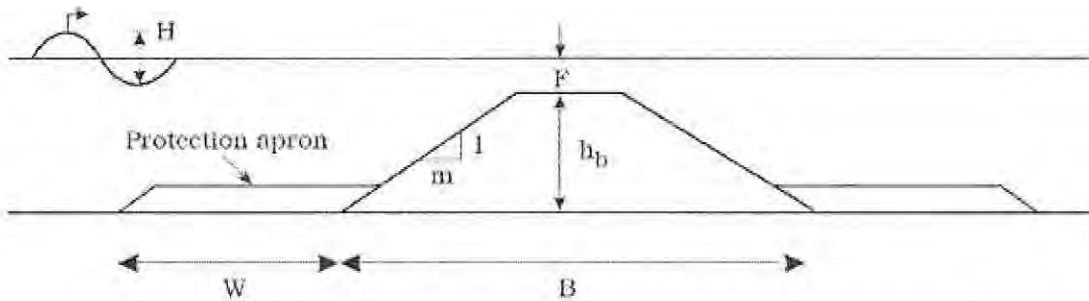


Figura 73: Tipología estructural recomendada para diques sumergidos.
(Fuente: Ref. 7).

El ancho recomendado para la capa de coraza se estima de acuerdo a:

$$b = N \cdot K_{\Delta} \cdot \left(\frac{W_{50}}{\omega_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ecuación 108}$$

Donde:

- N: Número de capas.
- K_{Δ} : Coeficiente de capa.
- W_{50} : Peso medio de los elementos (Kg)
- ω_r : Densidad volumétrica de los elementos de escollera (Kg/m^3).

El dimensionamiento de la protección al pie de la obra se estima de acuerdo a la siguiente formulación:

$$W = \alpha \frac{L}{4} \quad \text{Ecuación 109}$$

$$\alpha = 1 - \frac{mh_b}{L/4} \quad \text{Ecuación 110}$$

Donde:

- L: Longitud de onda de la ola incidente (m).
m: Pendiente del dique.
h_b: Altura del dique, medida desde el fondo (m).

En la Tabla 36 y 37 se resumen los resultados del diseño de cada uno de los casos seleccionados (Tabla 33), para el oleaje asociado a un periodo de retorno de 100 años y el rompiente en condición de pleamar y con marea meteorológica.

Al analizar la Tabla 37 se advierte que para los casos 2 y 3 no se cumplen las condiciones requeridas de transmisión, sin embargo, la altura de ola rompiente es un evento asociado a un gran periodo de retorno y de acuerdo a las bases de datos disponibles, está por sobre los 140²⁷ años, por lo tanto se considera que todas las alternativas diseñadas resistirán las solicitaciones de diseño.

Tabla 36: Resumen de diseño dique sumergido, para oleaje extremo.

(Fuente: Elaboración Propia).

			Hmo (Tr = 100 años) 4º Cuadrante			
		Definición	Nomenclatura [Unidad]	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Geometría Dique Principal	Altura del dique	hc [m]		5,0	4,5	4,0
	Anchura de Coronación	B [m]		18	24	28
	Cota NRS	d [m]		0,0	-0,5	-1,0
	Pendiente Talud	Tan α		0,5	0,5	0,5
Funcionamiento Hidrodinámico y Estabilidad Estructural	Peso de la Roca Coraza	W ₅₀ [Kg]		1500	1500	1500
	Peso de la Roca de Filtro	W _{50filtro} [Kg]		150 - 300	150 -300	150 - 300
	Transmisión	Kt		0,39	0,30	0,37
Geometría Protección al pie	Ancho de la Protección	W [m]		16,67	17,67	18,67
	Alto de la Protección	hp [m]		2,47	2,47	2,47

²⁷ Se comenta hasta este valor debido a que sólo se cuenta con 20 años de estadística y por lo tanto no es válido extrapolar en más de 7 veces la duración de la data.

Tabla 37: Resumen de diseño dique sumergido, para oleaje rompiente.

(Fuente: Elaboración Propia).

	Definición	Nomenclatura [Unidad]	Hb Rompiente (Miche 1951)		
			Caso 1	Caso 2	Caso 3
Geometría Dique Principal	Altura del dique	hc [m]	5,00	4,50	4,00
	Anchura de Coronación	B [m]	18,00	24,00	28,00
	Cota NRS	d [m]	0,00	-0,50	-1,00
	Pendiente Talud	Tan α	0,50	0,50	0,50
Funcionamiento Hidrodinámico y Estabilidad Estructural	Peso de la Roca Coraza	W_{50} [Kg]	1500,00	1500,00	1500,00
	Peso de la Roca de Filtro	$W_{50\text{filtro}}$ [Kg]	150 - 300	150 -300	150 -300
	Transmisión	Kt	0,37	0,42	0,48
Geometría Protección al pie	Ancho de la Protección	W [m]	16,67	17,67	18,67
	Alto de la Protección	hp [m]	2,47	2,47	2,47

(c) **ALTERNATIVA 4: DIQUE ARRECIFE.**

J. W. van der Meer propone en 1990 una formulación para el diseño estructural de los diques arrecifes dinámicamente estables compuestos por elementos de escollera. De acuerdo a esta formulación se considera la siguiente condición de estabilidad:

Sí $N_s^* < 6$, No hay averías.

Sí $6 < N_s^* < 8$, Inicio de Averías.

Sí $N_s^* > 8$, Daño Severo.

Donde N_s^* es el número de estabilidad espectral dado por:

$$N_s^* = \frac{(H^2 L_p)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{W_{50}}{\omega_r}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\omega_r}{\omega} - 1\right)} \quad \text{Ecuación 111}$$

Donde:

H: Altura de la ola de diseño (m).

- L_p : Longitud de onda al pie de la obra (m).
 W_{50} : Peso del elemento de escollera (kg).
 ω_r : Densidad volumétrica de los elementos de escollera (Kg/m^3).
 ω : Densidad del agua de mar (Kg/m^3).

Como este tipo de diques es diseñado considerando la deformación, esta debe ser controlada y en base a lo propuesto por *J. W. van der Meer (1990)*, el perfil de respuesta esta dado según la Figura 74:

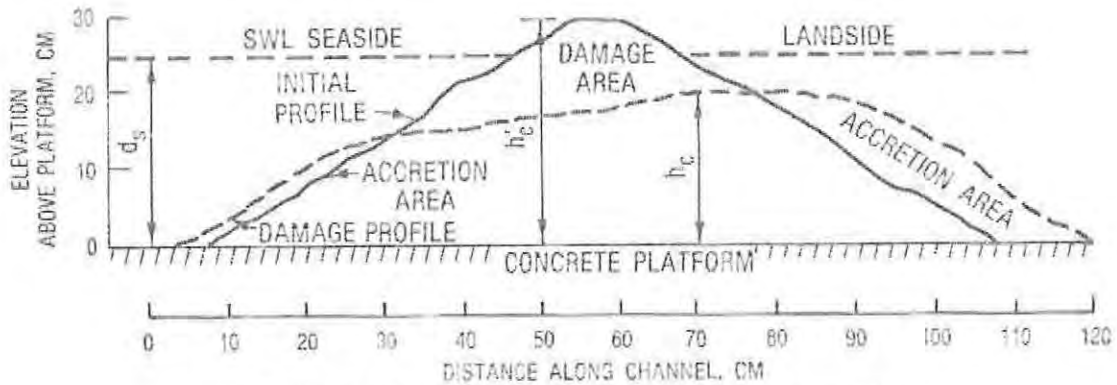


Figura 74: Sección de respuesta del dique arrecife.

(Fuente: Ref. 32).

$$C = \exp(aN_s^*) \quad \text{Ecuación 112}$$

$$a = -0.028 + 0.045C' + 0.034\left(\frac{h'_c}{d}\right) - 6 \cdot 10^{-9} B_n^2 \quad \text{Ecuación 113}$$

$$C' = \frac{A_t}{h'_c} \quad \text{Ecuación 114}$$

$$B_n = \frac{A_t}{D_{n50}^2} \quad \text{Ecuación 115}$$

$$h_c = \sqrt{\frac{A_t}{C}} \quad \text{Ecuación 116}$$

Donde:

- C : Pendiente de respuesta final del talud.
 C' : Pendiente de respuesta inicial del talud.
 h'_c : Altura de coronamiento inicial (m).
 h_c : Altura de coronamiento final (m).

B_n : Área adimensional.
 A_i : Área total de la sección del dique (m^2).

Para determinar el número de unidades de coraza desplazadas se emplea la formulación propuesta por Sheppard (Ref. 32), de acuerdo a:

$$D' = 19.4458 - 7.4546m + 0.760505m^2 - 0.010478m^3 \quad \text{Ecuación 117}$$

$$m = N_s^* \left(\frac{h'_c}{d} \right)^2 \quad \text{Ecuación 118}$$

Donde:

m : Parámetro de exposición.
 d : Profundidad en la zona de emplazamiento de la obra (m).

De la aplicación de las formulaciones recientemente expuestas se han obtenido las condiciones de diseño para cada uno de los casos a sensibilizar (Tabla 34) tanto para oleaje asociado a un periodo de retorno de 100 años como para la condición de rompiente. Los resultados son resumidos en la Tabla 38 y 39 respectivamente.

Del análisis de la Tabla 38 y 39 se advierte que el diseño del caso 1 se daña severamente ante la acción del oleaje de diseño y el rompiente, debido al bajo peso del elemento de coraza.

El caso 2 se encuentra en la zona de comienzo del daño ya que tiene un número de estabilidad espectral (N_s^*) igual a 6.28 y 7.38, para oleaje de diseño y rompiente respectivamente. Por ende, se utilizan pesos de 1500 kg.

Tabla 38: Resumen de diseño dique arrecife, para oleaje extremo.

(Fuente: Elaboración Propia).

			Hmo (Tr = 100 años) 4 Cuadrante					
			Caso 1	Caso 2	Caso 3			
	Definición	Nomenclatura [Unidad]	Averías Severas					
Geometría Inicial	Altura de Coronación	h'c [m]					6,5	6,5
	Anchura de Coronación	B [m]					25	25
	Cota NRS	d [m]					+1,5	+1,5
	Pendiente Talud	Tan α					0,25	0,25
Funcionamiento Hidrodinámico y Estabilidad Estructural	Peso de la Roca	W_{50} [Kg]					1110	1500
	Transmisión	Kt					0,35	0,37
	Número de Unidades Desplazadas	D' [un]					6,0	5,0
Geometría Final	Altura de Coronación	hc [m]					5,96	6,32
	Pendiente Talud	Tan α					0,10	0,12

Tabla 39: Resumen de diseño dique arrecife, para oleaje rompiente.

(Fuente: Elaboración Propia).

			Hb Rompiente (Miche 1951)			
		Definición	Nomenclatura [Unidad]	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Geometría Inicial	Altura de Coronación		$h'c$ [m]	Averías Severas	6,50	6,50
	Anchura de Coronación		B [m]		25,00	25,00
	Cota NRS		d [m]		+1,50	+1,50
	Pendiente Talud		$\tan \alpha$		0,25	0,25
Funcionamiento Hidrodinámico y Estabilidad Estructural	Peso de la Roca		W_{50} [Kg]		1110,00	1500,00
	Transmisión		Kt		0,50	0,52
	Número de Unidades Desplazadas		D' [un]		6,00	4,00
Geometría Final	Altura de Coronación		hc [m]		4,46	5,02
	Pendiente Talud		$\tan \alpha$		0,06	0,08

6.5 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA

Si bien la mayoría de los casos seleccionados para cada alternativa desarrollada cumplen con los requerimientos hidrodinámicos y son estructuralmente estables, se decide por aquella estructuración que tenga un menor costo por metro lineal construido.

Para esta estimación de costos se utilizó una base de precios unitarios referencial con la roca puesta en la cantera, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 40.

Tabla 40: Cubicación y presupuesto estimativo por ml construido.
(Fuente: Elaboración Propia)

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	UN.	PU	PT
1	ALTERNATIVA 2 - DIQUE SUMERGIDO				
1.1	CASO 1				
1.1.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	139,916	m ³	\$ 31.200	\$ 4.365.389
1.1.2	Filtro Rocas 150 - 300 Kg	80,458	m ³	\$ 28.550	\$ 2.297.062
				TOTAL CASO 1	\$ 6.662.450
1.2	CASO 2				
1.2.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	151,029	m ³	\$ 31.200	\$ 4.712.108
1.2.2	Filtro Rocas 150 - 300 Kg	82,785	m ³	\$ 28.550	\$ 2.363.503
				TOTAL CASO 2	\$ 7.075.611
1.3	CASO 3				
1.3.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	158,862	m ³	\$ 31.200	\$ 4.956.494
1.3.2	Filtro Rocas 150 - 300 Kg	75,392	m ³	\$ 28.550	\$ 2.152.436
				TOTAL CASO 3	\$ 7.108.930
2	ALTERNATIVA 3 - DIQUE ARRECIFE				
2.1	CASO 3				
2.1.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	331,500	m ³	\$ 31.200	\$ 10.342.800
				TOTAL CASO 3	\$ 10.342.800

De todos los casos evaluados el que presenta menor costo es el 1 para la alternativa 2, es decir un dique sumergido con las condiciones mostradas en la Figura 75.

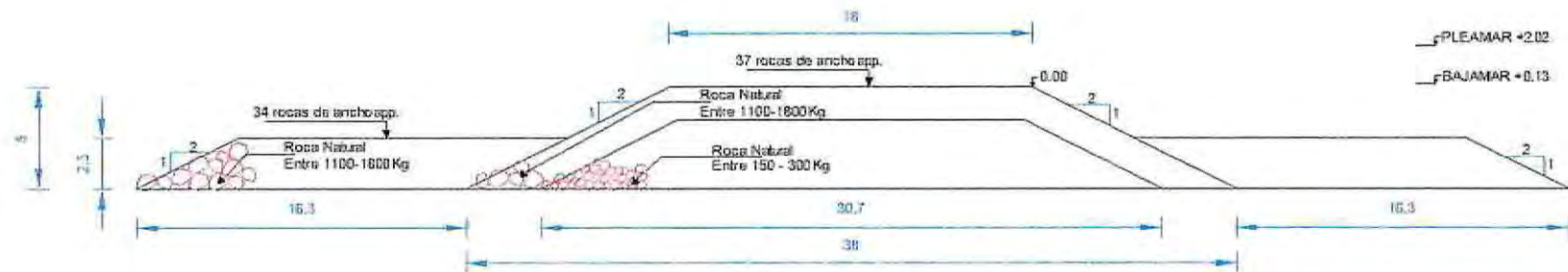


Figura 75: Sección tipo de la alternativa seleccionada.
(Fuente: Elaboración Propia).

6.6 DISEÑO DE LA NUEVA PLAYA EL PAPAGAYO

6.6.1 PLAYA DE ARENA

(a) ARENA DE REGENERACIÓN

Para determinar la arena de regeneración se debe tener en cuenta que, de acuerdo a las dinámicas litorales y la pendiente de la playa se obtendrán distintos tipos de rompientes. Considerando el oleaje más frecuente (Tabla 19) y la clasificación de las rompientes de acuerdo al número de Iribarren (Tabla 3 y ecuación 55), se han obtenido los tipos de rompiente para distintos diámetros (D_{50}), alturas y periodos (Gráfico 30).

Tabla 41: Casos de oleaje empleados combinando altura y periodo.

(Fuente: Elaboración Propia).

Caso	Altura [m]	Periodo [s]	Caso	Altura [m]	Periodo [s]
1	1.0	10	17	1.9	10
2	1.0	13	18	1.9	13
3	1.0	15	19	1.9	15
4	1.0	18	20	1.9	18
5	1.3	10	21	2.1	10
6	1.3	13	22	2.1	13
7	1.3	15	23	2.1	15
8	1.3	18	24	2.1	18
9	1.5	10	25	2.3	10
10	1.5	13	26	2.3	13
11	1.5	15	27	2.3	15
12	1.5	18	28	2.3	18
13	1.7	10	29	2.6	10
14	1.7	13	30	2.6	13
15	1.7	15	31	2.6	15
16	1.7	18	32	2.6	18

Se observa que la rompiente esperada para cada uno de los tamaños de arena se encuentra en el rango de descrestamiento (spilling) y voluta (plunging), siendo estos dos tipos los adecuados para el bañista, ya que las roturas del tipo Colapso (collapsing) y Oscilación (surfing) generan corrientes de retorno consideradas como peligrosas de acuerdo a las recomendaciones técnicas internacionales (Ref. 11).

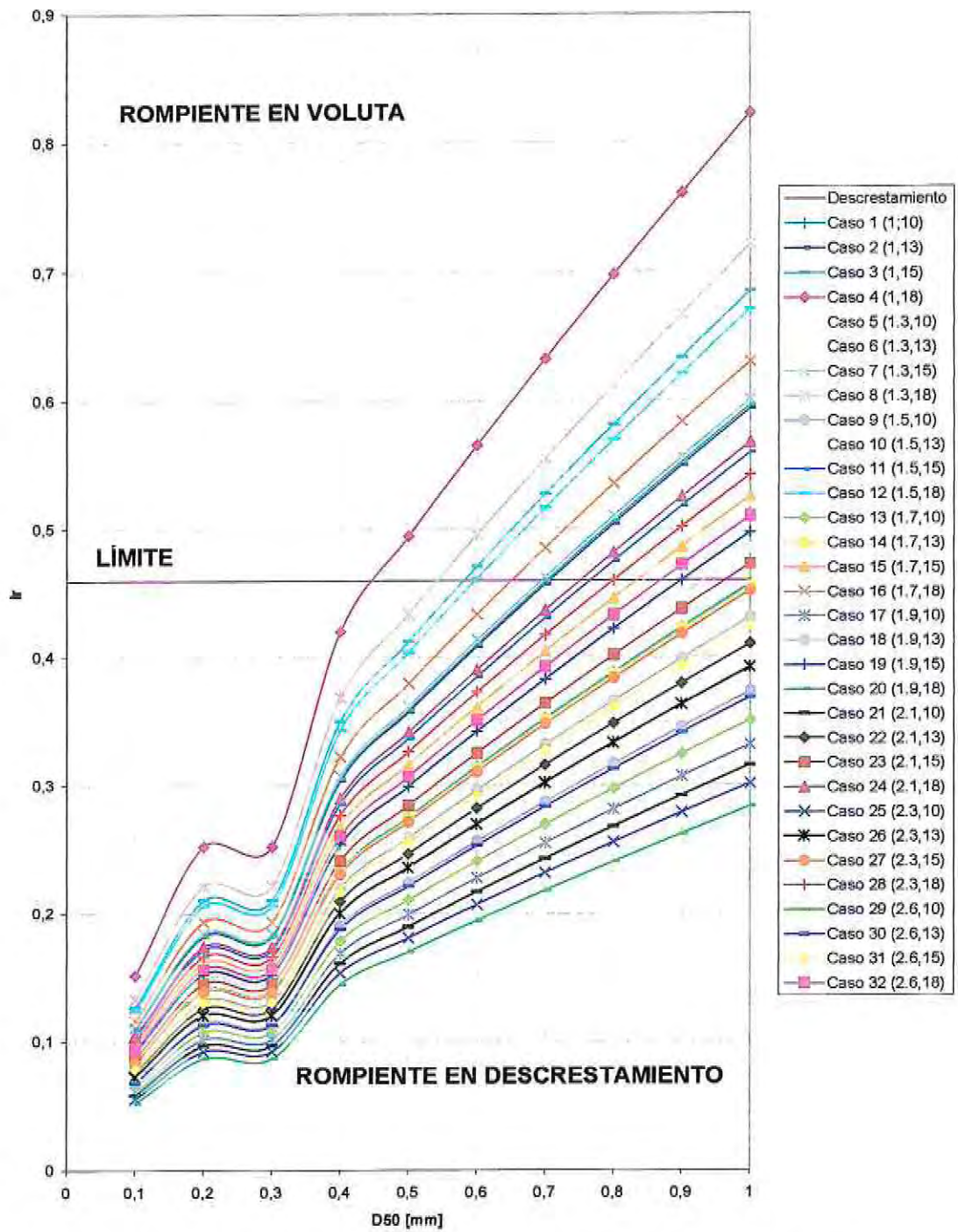


Gráfico 30: Tipo de rompiente de acuerdo al tamaño del sedimento y oleaje.
(Fuente: Elaboración Propia).

que cuentan con una forma similar e intensidades de usos comparables. Tales son los casos de Playa Amarilla, ubicada en la comuna de Con – Con y Playa Zapallar, en la comuna de Zapallar.

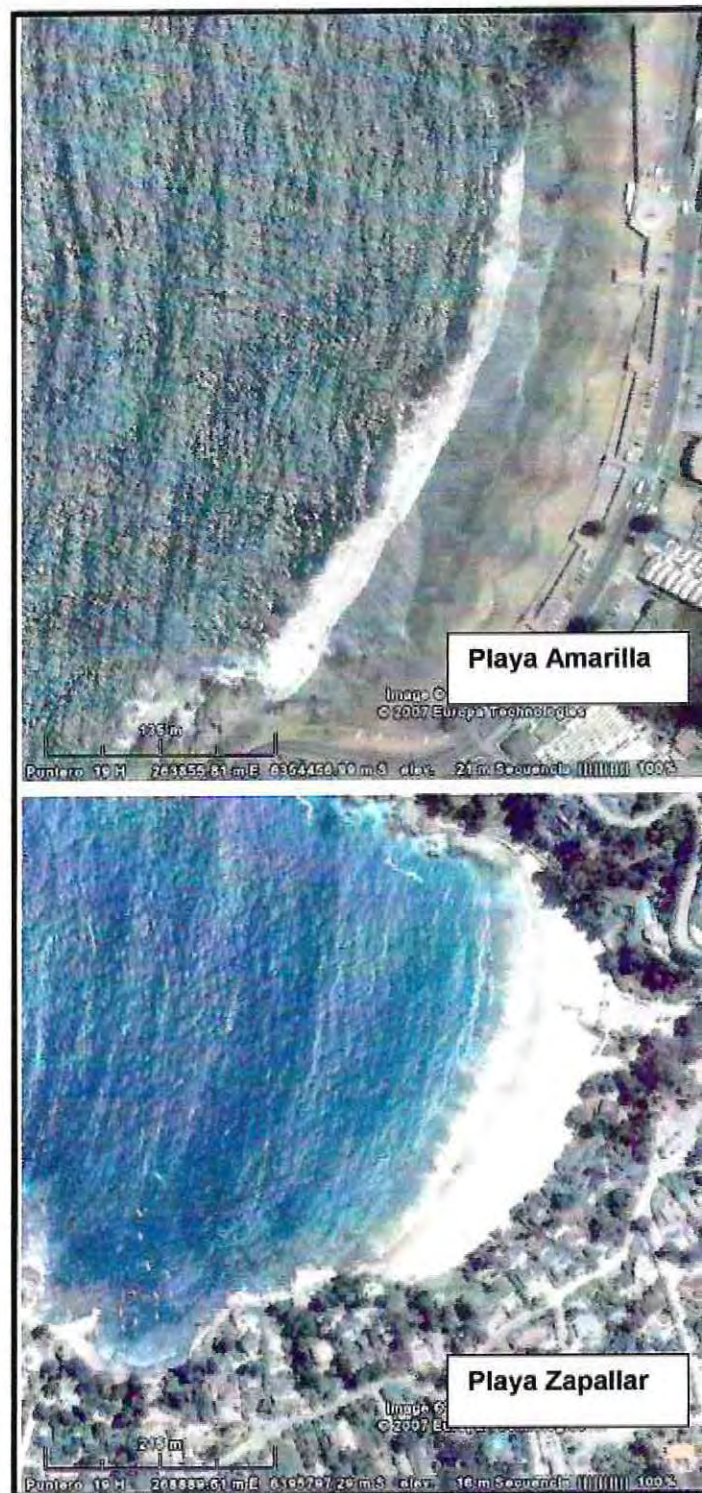


Figura 76: Playas utilizadas para comparar.
(Fuente: Elaboración Propia).

Estas dos playas, Amarilla y Zapallar, tienen una capacidad de saturación aproximada de 3200 Y 3900²⁸ personas respectivamente y se ha comparado con distintos anchos de regeneración para la nueva Playa El Papagayo, presentándose sus resultados en el Gráfico 32.

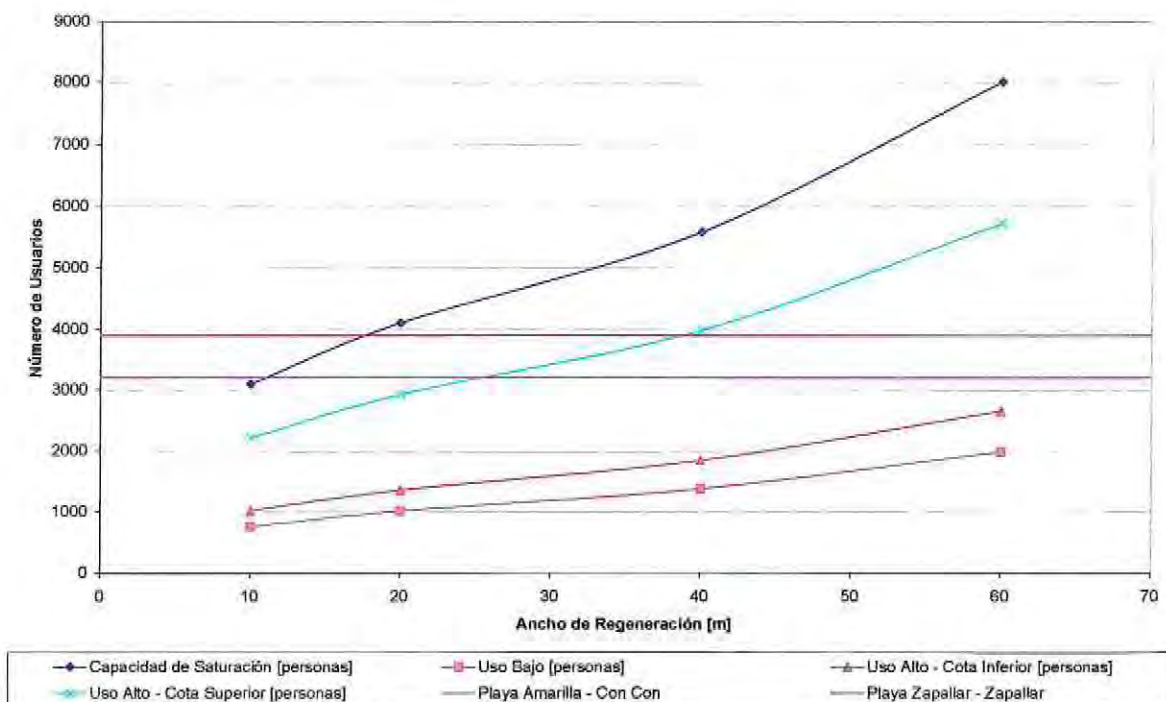


Gráfico 32: Capacidad de carga proyectada para la Playa El Papagayo de acuerdo al ancho de regeneración.

(Fuente: Elaboración Propia).

Del análisis del Gráfico 32 se puede determinar que para un ancho de regeneración de 20 metros, El Papagayo tendrá una capacidad de carga de saturación por sobre las playas con las cuales se ha comparado. Considerándose este valor como aceptable para la regeneración.

Se ha considerado una elevación del nivel actual de terreno de 50 centímetros mediante relleno con el nuevo sedimento, para que la capa superficial de arena de la playa tenga las mismas características que la zona de regeneración.

6.6.2 PLAYA DE PIEDRAS

Esta alternativa de solución se proyecta en base a los mismos criterios de diseño de la playa de arena, es decir, un ancho de regeneración de 20 metros y una elevación del nivel de terreno actual de 50 centímetros para obtener una capa superficial homogénea de piedra de regeneración.

La toma de decisión del tamaño del material de regeneración se hará en base a la evaluación del comportamiento a largo plazo de la playa, ya que hay una gran variedad de tamaños disponibles de gravas en las canteras de la costa central y la región metropolitana.

²⁸ Determinada mediante la división del área de la playa y el indicador de saturación recomendado (5 m²/persona).

6.7 ANÁLISIS EVOLUTIVO DE PLAYA EL PAPAGAYO

La evolución de una playa es uno de los aspectos más relevantes en el diseño de obras de regeneración de playas. Este análisis evolutivo se de acuerdo a la escala espacial de interés, siendo generalmente analizados los efectos que actúan al largo (orden de años) y corto plazo (orden de días).

Para el análisis al largo plazo existen diversas metodologías, tales como los métodos empíricos y modelos numéricos. Mientras que para la evolución al corto plazo actualmente se dispone de modelos de evolución del perfil y planta ante la acción de un temporal de características conocidas.

El modelo SMC (Sistema de Modelo Costero) contiene modelos de análisis al largo y corto plazo (Petra) que de acuerdo a las condiciones de la Nueva Playa El Papagayo no son aplicables. Debido a esto se procede a determinar el coeficiente de estabilidad (C_s) de la playa (Ecuación 119), para determinar su evolución tanto al largo como al corto plazo.

$$\begin{aligned} \frac{H_o}{L_o} < 4.8 \cdot 10^8 \left(\frac{H_o}{d_{50}} \right)^{-3.05} & \quad \text{acumulación} \\ \frac{H_o}{L_o} \geq 4.8 \cdot 10^8 \left(\frac{H_o}{d_{50}} \right)^{-3.05} & \quad \text{erosión} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 119}$$

La ecuación 119 fue obtenida por *Larson and Krauss (1988)* en base al ensayo en modelos físicos para distintas condiciones de oleaje y diámetro medio del sedimento. Este coeficiente de estabilidad (C_s), es un índice utilizado para clasificar las playas entre erosionables o playas con acumulación (sedimentación).

Finalmente basándose en la aplicación del C_s y la parábola PPY – MQL (ajustada especialmente para las condiciones de la Playa El Papagayo, ver sección 5.2.2 letra b) se analiza la estabilidad de la playa.

6.7.1 ANÁLISIS AL LARGO PLAZO

(a) PLAYA DE ARENA

Con las condiciones de oleaje mostradas en la Tabla 19 y las combinaciones de H y T (32 casos, ver Tabla 39), se evaluó la estabilidad de la playa considerando la intervención de un dique arrecife. Los resultados se presentan en el Gráfico 33.

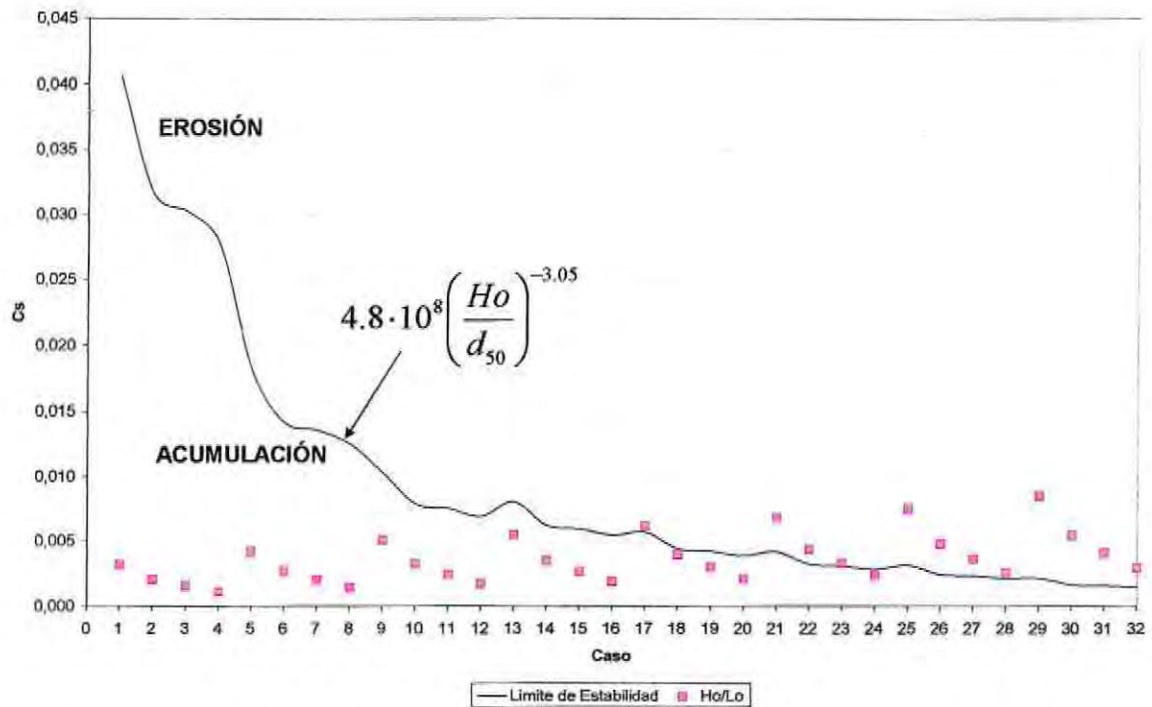


Gráfico 33: Cálculo del C_s para los 32 casos al largo plazo, para la playa de arena.
 (Fuente: Elaboración Propia).

De los cálculos realizados (ver Gráfico 33.) se puede concluir que el 62.5% de los casos presenta un C_s bajo del límite de estabilidad, es decir, hay acumulación o sedimentación. El 37.5% restante genera algún grado de erosión.

Los casos que generaría erosión en la Nueva Playa El Papagayo constituyen una frecuencia de ocurrencia de 21,6 % (ver Tabla 39), por lo tanto, se estima que habría que rellenar la playa en un 21,6% cada 20 años.

Tabla 42: Resumen de casos que erosiona en algún grado la playa.

(Fuente: Elaboración Propia).

Caso	Altura [m]	Periodo [s]	Ocurrencia en 20 años [%]
17	1.9	10	2.7
21	2.1	10	1.62
22	2.1	13	4.60
23	2.1	15	2.31
25	2.3	10	0.92
26	2.3	13	3.02
27	2.3	15	1.62
28	2.3	18	0.59
29	2.6	10	0.57
30	2.6	13	1.45
31	2.6	15	1.10
32	2.6	18	0.27
Total			21,6

(a.1) PLANTA DE EQUILIBRIO

Silvester and Hsu (1999) proponen una metodología especial para la determinación de la planta de equilibrio en playas encajadas con la intervención de un dique y recomiendan que se utilice como línea de control la distancia entre los puntos que encajan la playa (ver Figura 77).

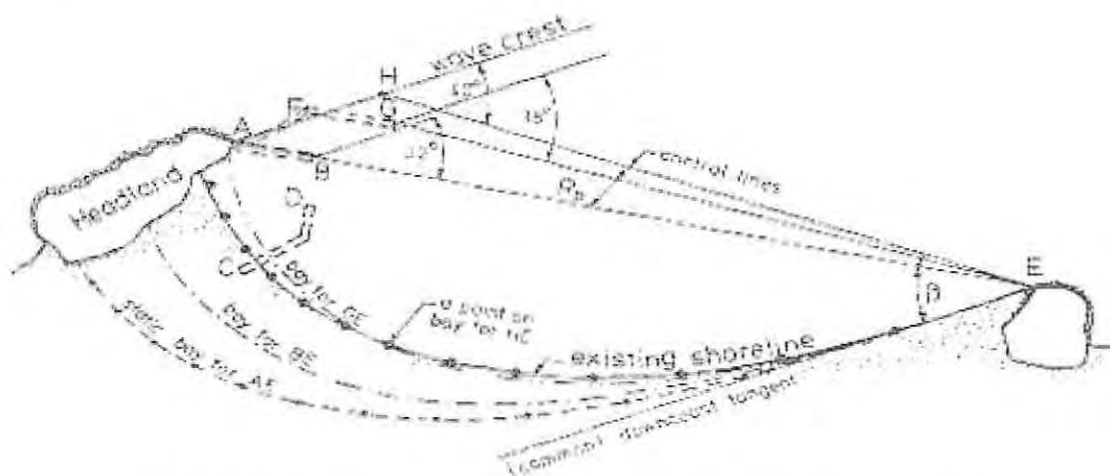


Figura 77: Formación de equilibrio para la Nueva Playa El Papagayo.

(Fuente: Ref. 27).

Considerando esta propuesta metodológica y aplicando la formulación de equilibrio obtenida especialmente para la Playa El Papagayo (parábola PPY – MQL) se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 78.

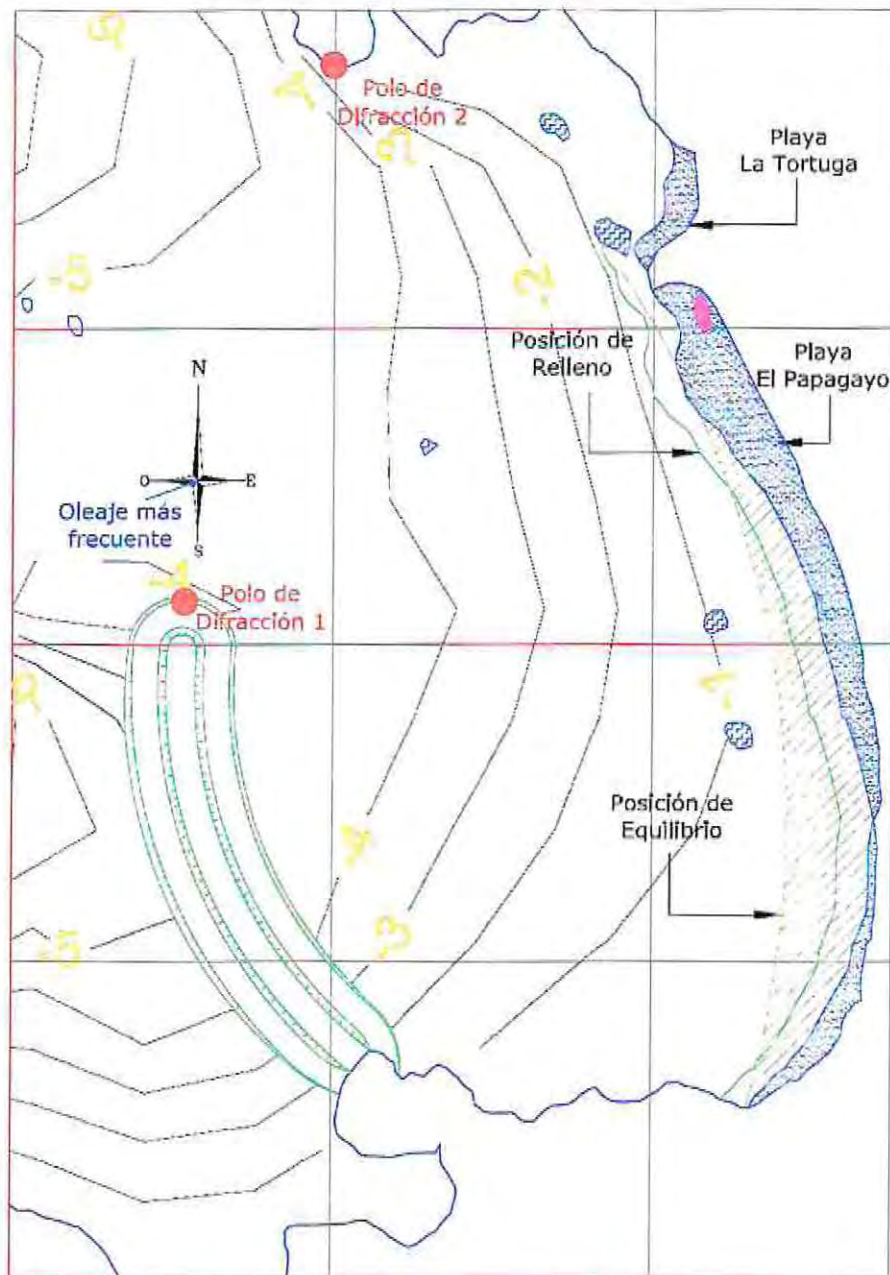


Figura 78: Nueva Playa El Papagayo, planta de equilibrio estimada para la playa de arena.

(Fuente: Elaboración Propia).

Con la intervención de la obra de protección se obtendrá una playa con un ancho mayor que la condición inicial, la cual se mantendrá estable de acuerdo a las condiciones de oleaje, cumpliendo de esta manera la función de regeneración de la costa.

(a.2) PERFIL DE EQUILIBRIO

Bruun (1954) mediante el estudio de una gran cantidad de perfiles de playas propone una ecuación para caracterizar el estado de equilibrio (ver ecuación 120). Luego *Dean (1977)* considerando esta propuesta determina el valor de n igual a $2/3$, verificando sus resultados con el ajuste de perfiles en la costa este de Estados Unidos y el Golfo de México. Finalmente *Sayao (1982)* mediante ensayos de laboratorio valida las hipótesis de Bruun y Dean.

$$h = kx^n \quad \text{Ecuación 120}$$

Si bien existen numerosas formulaciones para determinar el perfil al largo plazo, se aplicó el perfil de Dean como condición de equilibrio para la Nueva Playa El Papagayo, adoptando un valor de k igual a lo indicado por *Kriebel (1991)* (ecuación 121), teniendo presente que ω^{29} es la velocidad de caída del grano, ya que esta formulación es la de mayor utilización.

$$k = 0.51\omega^{0.44} \quad \text{Ecuación 121}$$

El Gráfico 34 muestra los resultados obtenidos de la aplicación del perfil de Dean considerando que se ha vaciado el volumen necesario de sedimento de regeneración para alcanzar ese estado de equilibrio. Sin embargo, la cantidad real de relleno puede ser inferior o superior, alcanzando perfiles por debajo o sobre el proyectado, pero manteniendo la misma pendiente.

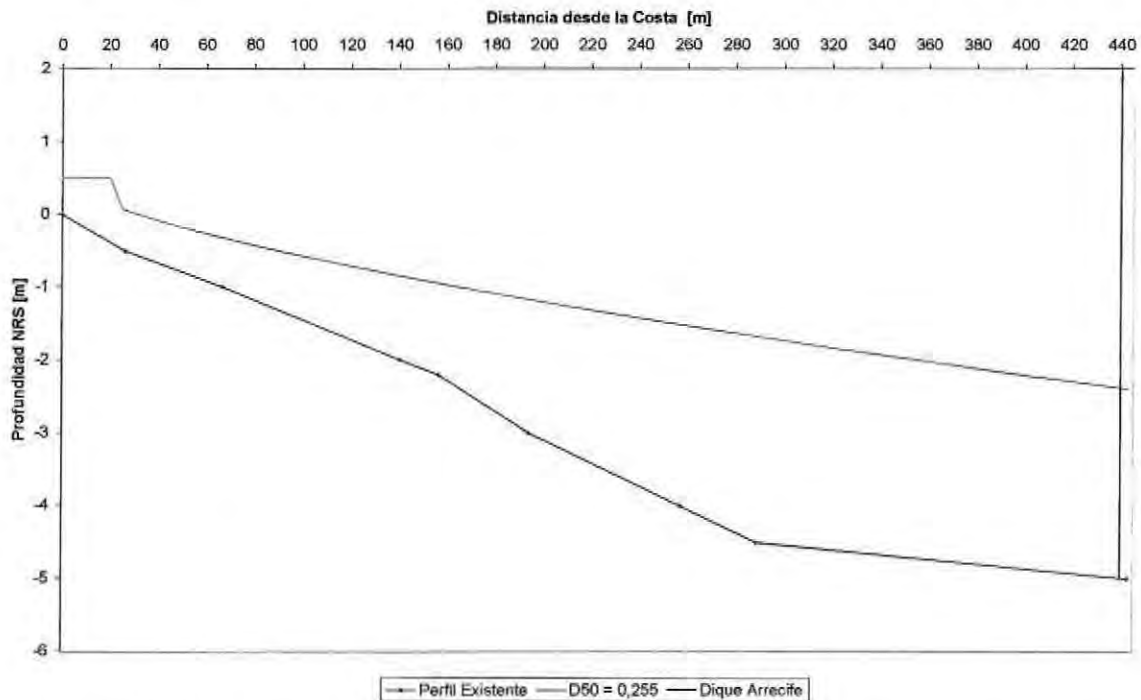


Gráfico 34: Perfil de equilibrio de regeneración Nueva Playa El Papagayo (arena).
(Fuente: Elaboración Propia).

²⁹ En el anexo I se presenta el modo de cálculo de la velocidad de sedimentación.

(b) *PLAYA DE PIEDRAS*

(b.1) *PLANTA DE EQUILIBRIO*

Según la literatura especializada (Ref. 35) las playas de piedra adoptan formas en planta a largo plazo de acuerdo a cuatro casos generales:

- Playas Lineales.
- Playas con Barras.
- Playas de Lago.
- Tómbolo.

La formación de cada una de éstas depende principalmente de las condiciones de vaciado (para los tres primeros puntos) y la intervención de elementos de protección (cuarto punto) tales como diques exentos o rompeolas convencionales que arrancan desde la costa. Para el caso de la planta de equilibrio en Playa El Papagayo, el vaciado será de manera natural, manteniendo la pendiente actual del terreno y un avance 20 metros que debido al tamaño de las gravas utilizado se mantendrá estable al largo plazo (Figura 79).



Figura 79: Nueva Playa El Papagayo, equilibrio estimado para la playa de piedras.
(Fuente: Elaboración Propia).

(b.2) PERFIL DE EQUILIBRIO

Como el diámetro de la grava a utilizar es de 64 milímetros, el perfil se mantendrá estable (debido al gran tamaño) de acuerdo a las condiciones de vaciado del relleno. Es por este motivo que el proceso de colocación del material se realizará manteniendo la pendiente natural del talud de arena de la actual playa El Papagayo.

La condición de equilibrio estimada para el perfil se ilustra en el Gráfico 35.

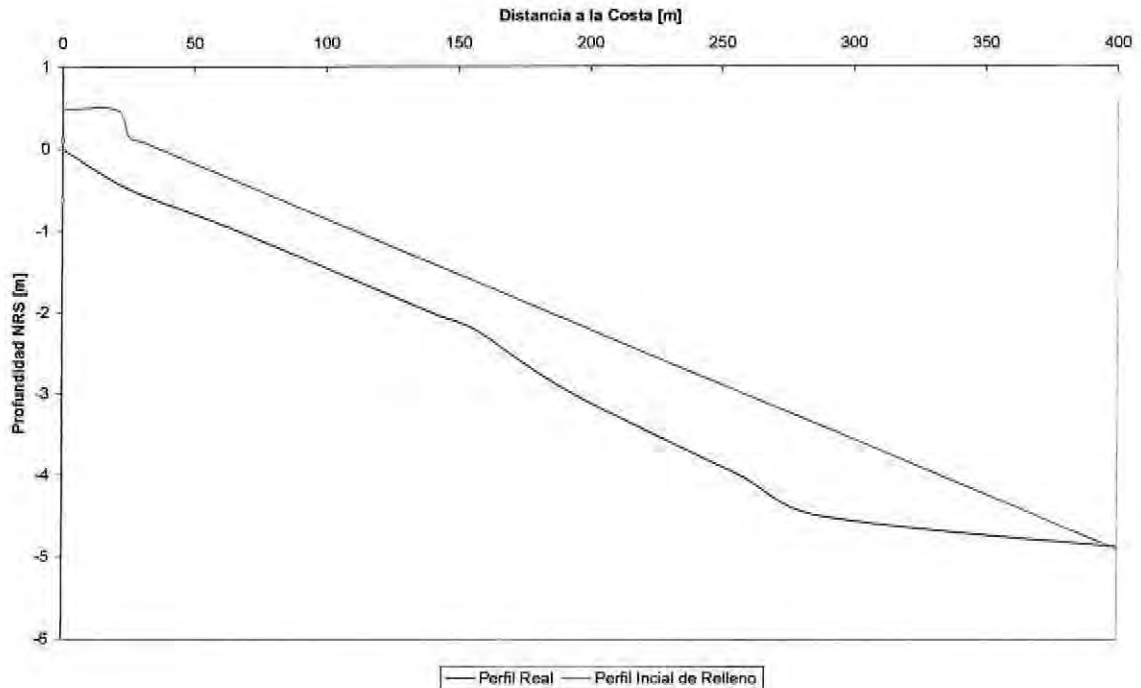


Gráfico 35: Perfil de equilibrio de regeneración Nueva Playa El Papagayo (piedras).
(Fuente: Elaboración Propia).

6.7.2 ANÁLISIS AL CORTO PLAZO

(a) PLAYA DE ARENA

En las Tabla 26 y 27 se detallan las tormentas para el tercer y cuarto cuadrante de direcciones que han ocurrido en 20 años frente a la Playa El Papagayo (Nodo 1, ver Figura 26), que constituyen un total de 23 y 24 casos respectivamente. Sin embargo, considerando que el coeficiente de estabilidad no depende de la dirección incidente del oleaje, la combinatoria se reduce a 33 eventos los cuales se muestran en la Tabla 43 y son los utilizados en la evaluación de la estabilidad de la playa al corto plazo.

Tabla 43: Tormentas para el análisis al corto plazo, en el Nodo 1.
 (Fuente: Elaboración Propia).

Caso	Altura [m]	Periodo [s]
1	5,40	14,98
2	5,31	14,82
3	5,27	14,71
4	5,05	14,74
5	4,75	14,66
6	4,39	12,68
7	4,19	12,9
8	4,02	14,79
9	3,97	9,93
10	3,96	14,25
11	3,89	13,61
12	3,86	15,42
13	3,81	9,66
14	3,80	12,55
15	3,74	13,97
16	3,72	13,33
17	3,67	13,15
18	3,53	13,67
19	3,51	13,81
20	3,47	12,35
21	3,44	13,1
22	3,43	12,72
23	3,36	14,59
24	3,33	15,76
25	3,29	12,95
26	3,25	12,71
27	3,24	10,27
28	3,15	10,40
29	3,10	8,74
30	3,01	7,83
31	2,94	13,97
32	2,89	10,96
33	2,76	14,65

Del listado de tormentas analizadas sólo el caso 33 mantiene la playa estable mientras que los restantes generan erosión (ver Gráfico 36). Sin embargo, estas tormentas son eventos de corta duración que persisten durante días, por lo tanto generarían estados morfodinámicos en la playa que pueden ser clasificados como barras o una erosión del perfil.

Considerando que el transporte de sedimentos en la erosión del perfil o la formación de barras es en sentido transversal a la línea de costa y que a los -5 m NRS se ha emplazado un dique arrecife, la arena que ha sido puesta en movimiento no escaparía de la Nueva Playa El Papagayo y volvería

a su posición de equilibrio en el mediano a largo plazo, es decir, sólo existiría una circulación sedimentaria sin pérdida de masa efectiva del sistema.

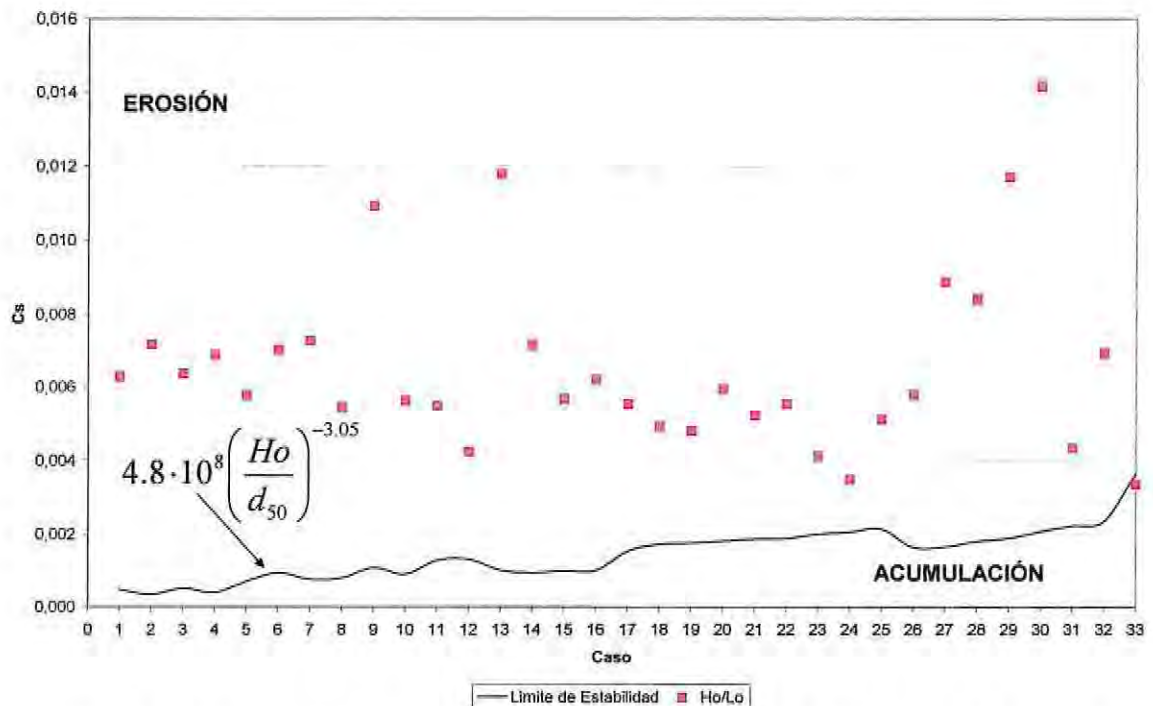


Gráfico 36: Cálculo del C_s para los 33 casos al corto plazo, para la playa de arena.
(Fuente: Elaboración Propia).

(b) PLAYA DE PIEDRAS

J. W. van der Meer (1988) propone en su tesis doctoral una formulación para el comportamiento de un perfil de piedras y playas de gravas (Ref. 33) ante la acción de un temporal. *Powel (1990)* en base a los estudios realizados por *J. W. van der Meer* concluye que el perfil de una playa de gravas (piedras) ante la acción de un temporal se formará con 500 olas y mantendrá su forma para los siguientes trenes de ondas.

La propuesta metodológica de *Powel (1990)* para el grupo de 500 olas se ilustra en la Figura 80.

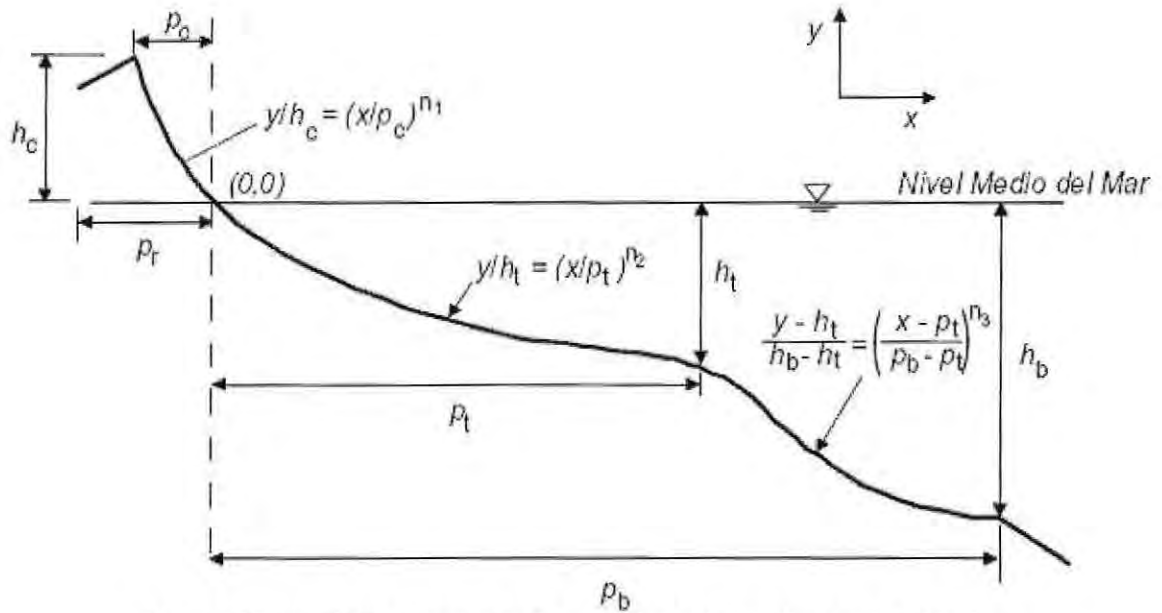


Figura 80: Perfil de respuesta de una playa de piedras ante 500 olas.
(Fuente: Ref. 11).

Cada uno de los factores se obtiene de acuerdo al siguiente set de ecuaciones:

$$\frac{Pr}{Hs} = 6.38 + 3.25 \ln \left(\frac{Hs}{L_{om}} \right) \quad \text{Ecuación 122}$$

$$\frac{PcD_{50}}{HsL_{om}} = -0.23 \left(\frac{HsT_m g^{1/2}}{D_{50}} \right)^{-0.588} \quad \text{Ecuación 123}$$

$$\frac{hc}{Hs} = 2.86 - 62.69 \left(\frac{Hs}{L_{om}} \right) + 443.29 \left(\frac{Hs}{L_{om}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 124}$$

$$PtD_{50} = 55.26 + 41.24 \left(\frac{Hs^2}{L_{om}D_{50}} \right) + 4.90 \left(\frac{Hs^2}{L_{om}D_{50}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 125}$$

$$\frac{ht}{D_{50}} = -10.41 - 0.025 \left(\frac{Hs^2}{D_{50}^{3/2} L_{om}^{1/2}} \right) - 7.5 \cdot 10^{-5} \left(\frac{Hs^2}{D_{50}^{3/2} L_{om}^{1/2}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 126}$$

$$\frac{Pb}{D_{50}} = 28.77 \left(\frac{Hs}{D_{50}} \right)^{0.92} \quad \text{Ecuación 127}$$

$$\frac{hb}{L_{om}} = -0.87 \left(\frac{Hs}{L_{om}} \right)^{0.64}$$

Ecuación 128

Donde:

- Pr : Límite del run – up [m].
- Pc : Límite de la cresta [m].
- hc : Altura de la cresta [m].
- Pt : Posición de la transición [m].
- ht : Profundidad de la transición [m].
- Pb : Posición de la profundidad de cierre [m].
- hb : Profundidad de cierre [m].
- Hs : Altura de ola significativa [m].
- D_{50} : Diámetro nominal medio del sedimento [m].
- L_{om} : Longitud de onda media en aguas profundas [m].
- Tm : Periodo del oleaje medio [s].
- g : Aceleración de gravedad [m/s²].

Aplicando la formulación de *Powel (1990)* y considerando la lista de tormentas mostrada en la Tabla 43, se calculó el perfil de erosión para cada uno de los 33 casos y se determinó la envolvente de toda la simulación (ver Gráfico 37).

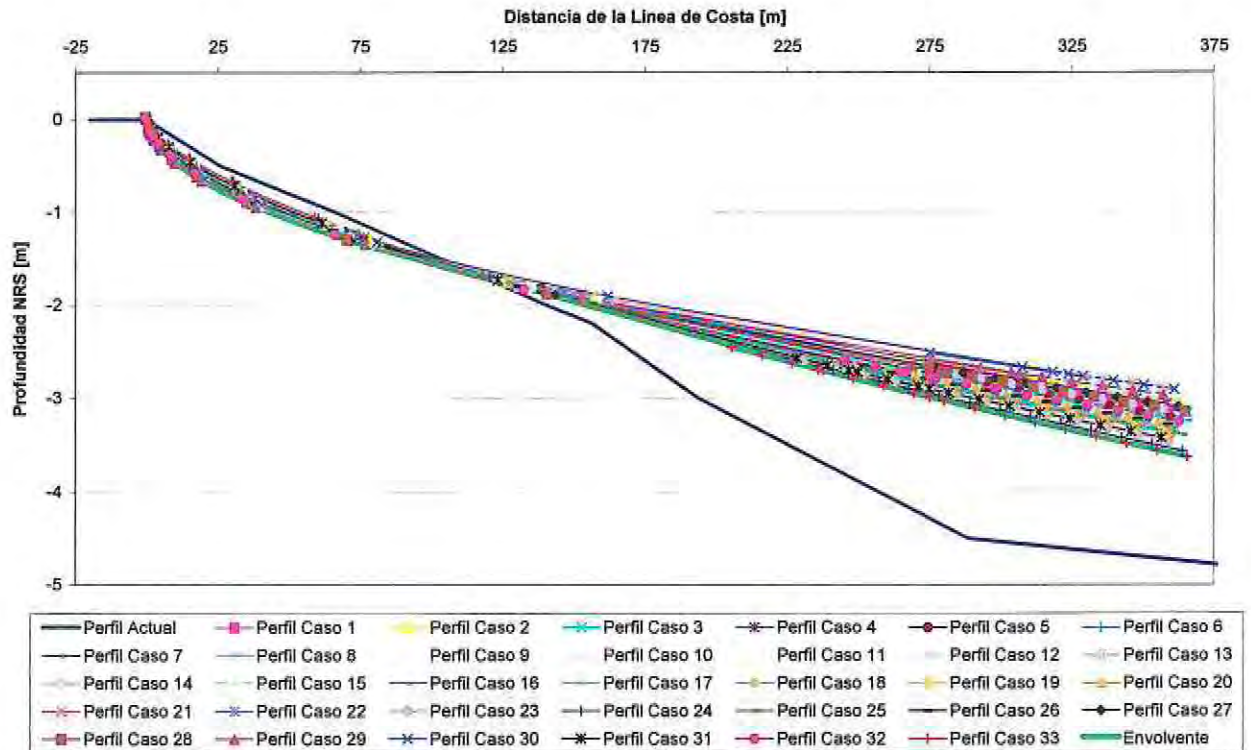


Gráfico 37: Envolvente de erosión del perfil para la playa de piedras.

(Fuente: Elaboración Propia).

El perfil de piedras se erosionará en la cara de la playa formándose una barra al pie del talud, siendo éste un comportamiento similar al de una playa de arena ante la acción de un temporal.

Esta forma transversal de la playa será encontrada principalmente en época de invierno, ya que es en esta estación del año donde se presentan las mayores tormentas.

6.8 CUBICACIÓN PROYECTOS DE REGENERACIÓN

Las cubicaciones se han obtenido en dos versiones, la primera se ha hecho sin considerar la utilización de las rocas de la protección al pie del talud (ver Tabla 44), mientras que la segunda se ha hecho considerándolas (ver Tabla 45).

El precio unitario del metro cúbico de arena se obtuvo de la aplicación del impuesto indicado en el reglamento de concesiones marítimas, mientras que el volumen requerido se obtuvo con la ayuda del software Tutor de Ingeniería de Costas (TIC) del Sistema de Modelado Costero (SMC) y considera en el cálculo el porcentaje de finos que se pierde al momento del vaciado.

Tabla 44: Costo de proyectos de regeneración sin considerar material existente.
(Fuente: Elaboración Propia).

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	UN.	PU	PT
1	PROYECTO 1 - PLAYA DE ARENA				
1.1	MATERIAL DE PLAYA				
1.1.1	Relleno Arena D50 = 0.256 mm	454.761,500	m ³	\$ 202	\$ 92.086.475
TOTAL MATERIAL PLAYA					\$ 92.086.475
1.2	DIQUE PRINCIPAL				
1.2.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	12.346,712	m ³	\$ 31.200	\$ 385.217.416
1.2.2	Filtro Rocas 150 - 300 Kg	16.451,970	m ³	\$ 28.550	\$ 469.703.745
1.3	PIE DE APOYO				
1.3.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	16.666,311	m ³	\$ 31.200	\$ 519.988.908
TOTAL PROTECCIÓN					\$ 1.374.910.070
TOTAL PROYECTO 1					\$ 1.466.996.545
2	PROYECTO 2 - PLAYA DE GRAVAS				
2.1	GRAVAS D ₅₀ = 64 mm	110.804,083	m ³	\$ 17.000	\$ 1.883.669.412
TOTAL PROYECTO 2					\$ 1.883.669.412

Tabla 45: Costo de proyectos de regeneración considerando material existente.
(Fuente: Elaboración Propia).

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	UN.	PU	PT
1	PROYECTO 1 - PLAYA DE ARENA				
1.1	MATERIAL DE PLAYA				
1.1.1	Relleno Arena D50 = 0.256 mm	454.761,500	m ³	\$ 202	\$ 92.086.475
TOTAL MATERIAL PLAYA					\$ 92.086.475
1.2	DIQUE PRINCIPAL				
1.2.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	9.374,705	m ³	\$ 31.200	\$ 292.490.787
1.2.2	Filtro Rocas 150 - 300 Kg	15.009,100	m ³	\$ 28.550	\$ 428.509.792
1.3	PIE DE APOYO				
1.3.1	Coraza Roca 1100 - 1800 (kg)	16.666,311	m ³	\$ 31.200	\$ 519.988.908
TOTAL PROTECCIÓN					\$ 1.240.989.487
TOTAL PROYECTO 1					\$ 1.333.075.962
2	PROYECTO 2 - PLAYA DE GRAVAS				
2.1	GRAVAS D ₅₀ = 64 mm	110.804,083	m ³	\$ 17.000	\$ 1.883.669.412
TOTAL PROYECTO 2					\$ 1.883.669.412

Si se comparan los costos totales del proyecto 1 indicados en las tablas 44 y 45, se advierte una disminución del 9% en el monto final de los materiales necesarios para la construcción.

El proyecto que presenta un menor costo es el 1 considerando la utilización de las rocas existentes en la protección instalada al pie del talud.