



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**ANÁLISIS MORFODINÁMICO Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE  
LA LÍNEA LITORAL DE LA BAHÍA DE LEBU. EFECTOS DEL  
TSUNAMI DEL 27/F DE 2010.**

**Daniel Eduardo Rojas Iturra**

Octubre 2012

**ANÁLISIS MORFODINÁMICO Y EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA LÍNEA LITORAL DE LA BAHÍA  
DE LEBU. EFECTOS DEL TSUNAMI DEL 27/F DE 2010.**

Daniel Eduardo Rojas Iturra

**COMISIÓN REVISORA**

**NOTA**

**FIRMA**

MATÍAS QUEZADA LABRA  
Profesor guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

DRA. CAROLINA MARTINEZ REYES  
Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

MAURICIO MOLINA PEREIRA  
Docente

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **DECLARACIÓN**

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a mi profesor guía Don Matías Quezada por su colaboración, voluntad e intensa preocupación en el desarrollo de este proyecto de título. También agradecer a la Doctora Carolina Martínez de la Universidad de Concepción, por hacerme participe de su proyecto FONDECYT N°1100379 y por otorgarme la información necesaria para el proceso de elaboración.

Por otro lado, agradecer el apoyo incondicional de mi madre Lilian, mi tía María Elena y mis tíos suecos Marlene y Stefan que a pesar de la distancia me han apoyado en todo momento. Son la base de mi formación y todo lo logrado se lo debo a ustedes. Muchas gracias.

También agradecer a los verdaderos amigos por el constante ánimo que me dan día a día y a pesar de los momentos difíciles, siempre estuvieron dando muestras de apoyo. Agradecer a mi polola por los consejos y recomendaciones que me brindó en el proceso y periodo de confección del proyecto, además de su constante respaldo anímico.

*Dedicada a mi abuela Clementina, que a  
pesar de su memoria, estaría feliz.*

# **ÍNDICE**

<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
2.1 Zona Costera .....	3
2.2 Sedimentología .....	4
2.3 Transporte de Sedimentos .....	5
2.4 Morfodinámica .....	8
2.5 Evolución Costera .....	8
2.6 Oleaje .....	8
2.7 Tsunami .....	10
<b>3. ALCANCES</b> .....	<b>11</b>
<b>4. OBJETIVOS</b> .....	<b>11</b>
4.1 Objetivo General .....	11
4.2 Objetivos Específicos .....	11
<b>5. CAMPAÑA DE TERRENO</b> .....	<b>12</b>
5.1 Descripción del Lugar de Estudio .....	12
5.2 Batimetría y Línea de Costa .....	13
5.3 Mareas .....	15
5.3.1 Marea Armónica .....	18
5.3.2 Marea No Armónica .....	18
<b>6. EVOLUCIÓN SEDIMENTARIA</b> .....	<b>19</b>
6.1 Descripción Granulométrica .....	19
6.1.1 Área de Muestreo .....	19
6.1.2 Herramientas y Proceso de Tamizado .....	20
6.2 Descripción Estadística .....	22
6.3 Transporte de Sedimentos .....	24
6.3.1 Condición de Playa en Equilibrio .....	25
6.3.2 Implementación Fotografías Aéreas .....	26

<b>7.</b>	<b>DESCRIPCIÓN MODELACIÓN NUMÉRICA .....</b>	<b>27</b>
7.1	Modelo de Propagación de Oleaje .....	27
7.1.1	Condiciones Espectrales del Oleaje .....	27
7.1.2	Steady-State Spectral Wave Model (STWAVE).....	28
7.1.3	Metodología de Transferencia de Oleaje .....	28
7.1.4	Parámetros de Resumen .....	31
7.2	Modelo de Evolución Costera.....	32
7.2.1	Sistema de Modelado Costero SMC (U. de Cantabria) .....	32
7.2.2	Tipos de Modelos Implementados .....	33
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>38</b>
8.1	Mareas.....	38
8.1.1	Análisis Armónico 2011.....	38
8.1.2	Análisis No Armónico 2011 .....	43
8.1.3	Comparación de campañas Análisis Armónico.....	47
8.1.4	Comparación de campañas Análisis No Armónico.....	49
8.2	Análisis Granulométrico .....	50
8.2.1	Análisis Transversal .....	50
8.2.2	Tipo de Sedimento en la Playa .....	57
8.3	Análisis Estadístico de los Sedimentos .....	60
8.3.1	Perfil 1 .....	60
8.3.2	Perfil 2 .....	61
8.3.3	Perfil 4 .....	61
8.3.4	Perfil 3 .....	62
8.4	Transporte de Sedimentos .....	63
8.4.1	Cambios Batimétricos .....	63
8.4.2	Cambios en Perfil .....	67
8.4.3	Transporte Total de Sedimentos.....	69
8.4.4	Comparación con análisis fotográfico Aéreo.....	69
8.5	Transferencia de Olas.....	72
8.5.1	Pre-Tsunami.....	72
8.5.2	Post-Tsunami .....	75
8.6	Clima de Oleaje Operacional.....	78
8.6.1	Pre-Tsunami.....	78
8.6.2	Post-Tsunami .....	79
8.6.3	Comparación Climas de Ola .....	80
8.7	Evolución Línea Litoral.....	83

8.7.1	Ajuste Logarítmico Mediante SMC (U. de Cantabria) .....	83
8.7.2	Ajuste Parabólico Mediante SMC (U. de Cantabria) .....	87
8.7.3	Comparación de Resultados .....	91
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>97</b>
<b>11.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>100</b>
11.1	Anexo Análisis Granulométrico .....	101
11.1.1	Análisis Transversal .....	101
11.2	Anexo Análisis Estadístico de los Sedimentos .....	108
11.3	Anexo Olas .....	112
11.4	Anexo Clima de Oleaje Operacional.....	116
11.4.1	Pre-Tsunami.....	116
11.4.2	Post-Tsunami .....	119
11.5	Anexo Mareas .....	123

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Representación de un tipo de franja costera. ....	4
Figura 2-2: Erosión y acreción en estructuras por transporte longitudinal.....	6
Figura 2-3: Evacuación de aguas de la playa mediante corriente de resaca. ....	7
Figura 2-4: Perfil de tormentas y de acreción. ....	7
Figura 2-5: Características del perfil de una playa.....	9
Figura 2-6 Tipos de rotura.....	10
Figura 5-1: Lugar de Estudio. ....	12
Figura 5-2: Garmin GPSMAP 421s Combo Dual Transductor. ....	13
Figura 5-3: GPS Tramin (izquierda). GPS doble frecuencia (derecha). Proceso de batimetría con GPS móvil (abajo). ....	14
Figura 5-4: Localización de Mareógrafos y perfiles, Lebu.....	16
Figura 5-5: Instalación de mareógrafos para fondeo en el mar (izquierda) y en el río (derecha).....	17
Figura 5-6: HOBO UB-20. ....	17
Figura 5-7: Óptica estación Base. ....	17
Figura 6-1: Muestras a lo largo de los perfiles.....	20
Figura 6-2: Balanza digital (arriba); Vasos precipitados (izquierda); Maquina Tamizadora (derecha).....	21
Figura 6-3: Curvas de apuntalamiento.....	22
Figura 6-4: Curvas de Asimetría.....	23
Figura 6-5: Método de Cálculo en el Transporte de Sedimentos. ....	24
Figura 6-6: Representación de Perfiles. ....	25
Figura 7-1: Espectro direccional de oleaje.....	27
Figura 7-2: Orientación de grillas para transferencia semipurista. ....	29
Figura 7-3: Punto de Monitoreo.....	31
Figura 7-4: Aproximación de Modelos con la Bahía de Lebu (Marzo 2010).....	34
Figura 7-5: Representación Matemática Espiral Logarítmica.....	35
Figura 7-6: Representación Matemática Espiral Parabólica. ....	36
Figura 7-7: Correlación coeficientes y ángulo de incidencia $\beta$ . ....	36
Figura 8-1: Análisis Armónico en el mar, 2011. ....	39
Figura 8-2: Análisis Armónico en el río, 2011. ....	41
Figura 8-3: Comparación flujos residuales, 2011.....	42
Figura 8-4: Análisis No Armónico en el mar, 2011.....	44
Figura 8-5: Pleamar y bajamar en el sensor Mar, 2011. ....	44
Figura 8-6: Análisis No Armónico en el río, 2011.....	46
Figura 8-7: Pleamar y bajamar en el sensor Río, 2011.....	46
Figura 8-8: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 1. ....	52
Figura 8-9: Diagrama d50 para la playa de Lebu.....	59
Figura 8-10: Cambios Batimétricos [m], Caso 2011-1993.....	64
Figura 8-11: Cambios Batimétricos [m], Caso 2012-2011.....	64
Figura 8-12: Cambios Volumétricos [m <sup>3</sup> ], Caso 2011-1993. ....	65
Figura 8-13: Cambios Volumétricos [m <sup>3</sup> ], Caso 2012-2011. ....	65
Figura 8-14: Comparación de Cambios Volumétricos.....	66
Figura 8-15: Volumen Transportado [m <sup>3</sup> ], Caso 2011-1993.....	66
Figura 8-16: Evolución Temporal de Perfiles. ....	68
Figura 8-17: Cambios Espacio Temporales de la Línea. Arriba Pleamar, abajo Bajamar .....	70

Figura 8-18: Cambios Espacio Temporales de la Línea Litoral en Bajamar.....	71
Figura 8-19: Resultado Modelación Pre-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$ ; $T_p=14[s]$ ; $MWD=W$ . ....	72
Figura 8-20: Resultado Modelación Pre-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$ ; $T_p=14[s]$ ; $MWD=NW$ . ....	73
Figura 8-21: Coeficiente de Shoaling en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Pre-Tsunami. ....	74
Figura 8-22: Dirección de aguas someras en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Pre-Tsunami.....	74
Figura 8-23: Resultado Modelación Post-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$ ; $T_p=14[s]$ ; $MWD=W$ . ....	75
Figura 8-24: Resultado Modelación Post-Tsunami: $H_{mo}=1[m]$ ; $T_p=14[s]$ ; $MWD=NW$ . ....	76
Figura 8-25: Coeficiente de Shoaling en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Post-Tsunami. ....	76
Figura 8-26: Dirección de aguas someras en relación al Periodo y Dirección <i>offshore</i> , caso Post-Tsunami. ....	77
Figura 8-27: Comparación curvas de excedencia.....	80
Figura 8-28: Comparación de oleaje mediante rosas direccionales.....	81
Figura 8-29: Histogramas de Frecuencia relativa en función de $H_{mo}$ [m] y $T_p$ [s]. ....	82
Figura 8-30: Espaciamiento de 200 [m] entre cada medición. ....	83
Figura 8-31: Ajuste Logarítmico para año 1984 en la bahía de Lebu.....	85
Figura 8-32: Ajuste Logarítmico para año 1993 en la bahía de Lebu.....	85
Figura 8-33: Ajuste Logarítmico para año 2010 en la bahía de Lebu.....	86
Figura 8-34: Ajuste Logarítmico para año 2011 en la bahía de Lebu.....	86
Figura 8-35: Ajuste Parabólico para año 1984 en la bahía de Lebu. ....	88
Figura 8-36: Ajuste Parabólico para año 1993 en la bahía de Lebu. ....	89
Figura 8-37: Ajuste Parabólico para año 2010 en la bahía de Lebu. ....	89
Figura 8-38: Ajuste Parabólico para año 2011 en la bahía de Lebu. ....	90
Figura 8-39: Avance y Retroceso en la Bahía de Lebu en Función al Ajuste Logarítmico. ...	92
Figura 8-40: Avance y Retroceso en la Bahía de Lebu en Función al Ajuste Parabólico. ....	92
Figura 11-1: Curvas Granulométricas Perfil 1.....	101
Figura 11-2: Curvas Granulométricas Perfil 2.....	102
Figura 11-3: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 2. ....	103
Figura 11-4: Curvas Granulométricas Perfil 3.....	104
Figura 11-5: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 3. ....	105
Figura 11-6: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 4.....	106
Figura 11-7: Curvas Granulométricas Perfil 4.....	107
Figura 11-8: Rosas direccionales, caso Pre-Tsunami.....	117
Figura 11-9: Curva de excedencia, caso Pre-Tsunami. ....	118
Figura 11-10: Rosas direccionales, caso Post-Tsunami. ....	120
Figura 11-11: Curva de excedencia, caso Post-Tsunami.....	121
Figura 11-12: Histogramas de Frecuencia acumulada en función de $H_{mo}$ [m] y $T_p$ [s]. ....	122
Figura 11-13: Correlación mareas en el mar, 2011.....	125
Figura 11-14: Correlación mareas en el río, 2011.....	125
Figura 11-15: Densidad espectral de energía en el mar, 2011. ....	126
Figura 11-16: Densidad espectral de energía en el río, 2011. ....	126
Figura 11-17: Comparación NMM, análisis armónico, 2011. ....	127
Figura 11-18: Comparación de densidades espectrales de energía, 2011. ....	127
Figura 11-19: Pleamar y bajamar, campaña 2011.....	128
Figura 11-20: Comparación parámetros No Armónicos, 2011. ....	129
Figura 11-21: Comparación densidad espectral en sensor Mar, 2011 y 2012. ....	130
Figura 11-22: Comparación Pronósticos NMM en sensor Mar, 2011 y 2012. ....	130

Figura 11-23: Comparación Flujos Residuales en sensor Mar, 2011 y 2012. ....	131
Figura 11-24: Comparación densidad espectral en sensor Río, 2011 y 2012. ....	131
Figura 11-25: Comparación Pronósticos NMM en sensor Río, 2011 y 2012. ....	132
Figura 11-26: Comparación Flujos Residuales en sensor Río, 2011 y 2012. ....	132
Figura 11-27: Comparación parámetros No Armónicos en sensor Mar, 2011 y 2012. ....	133
Figura 11-28: Pleamar y bajamar en el sensor Mar, campaña 2011 y 2012. ....	134

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 6-1: Escala granulométrica de Udden & Wentworth (1922). ....	19
Tabla 7-1: Modelos con direcciones propagadas. ....	30
Tabla 7-2: Direcciones para cada grilla. ....	30
Tabla 7-3: Configuración espectral del caso 202.5 [°]. ....	30
Tabla 8-1: Parámetros de marea en el mar, 2011. ....	38
Tabla 8-2: Parámetros de marea en el río, 2011. ....	40
Tabla 8-3: Parámetros No Armónicos en el mar, 2011. ....	43
Tabla 8-4: Parámetros No Armónicos en el río, 2011. ....	45
Tabla 8-5: Comparación del tipo mareal de cada campaña en el mar. ....	48
Tabla 8-6: Comparación del tipo mareal de cada campaña en el río. ....	48
Tabla 8-7: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 1. ....	51
Tabla 8-8: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 2. ....	54
Tabla 8-9: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 3. ....	55
Tabla 8-10: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 4. ....	56
Tabla 8-11: Clasificación de Sedimentos, Perfil 1. ....	57
Tabla 8-12: Clasificación de Sedimentos, Perfil 2. ....	57
Tabla 8-13: Clasificación de Sedimentos, Perfil 4. ....	58
Tabla 8-14: Clasificación de Sedimentos, Perfil 3. ....	58
Tabla 8-15: Transporte Total de Sedimentos. ....	69
Tabla 8-16: Cambios en la Línea Litoral de la Bahía de Lebu por Medio de Ajuste Logarítmico. ....	87
Tabla 8-17: Cambios en la Línea Litoral de la Bahía de Lebu por Medio de Ajuste Parabólico. ....	90
Tabla 11-1: Indicadores Estadísticos, Perfil 1. ....	108
Tabla 11-2: Indicadores Estadísticos, Perfil 2. ....	109
Tabla 11-3: Indicadores Estadísticos, Perfil 3. ....	110
Tabla 11-4: Indicadores Estadísticos, Perfil 4. ....	111
Tabla 11-5: Funciones de Transferencia caso Pre-Tsunami. ....	112
Tabla 11-6: Funciones de Transferencia caso Post-Tsunami. ....	114
Tabla 11-7: Tabla de incidencia de Hmo y Tp, caso Pre- <i>Tsunami</i> . ....	116
Tabla 11-8: Tabla de incidencia de MWD y Hmo, caso Pre- <i>Tsunami</i> . ....	116
Tabla 11-9: Tabla de incidencia de Hmo y Tp, caso Post- <i>Tsunami</i> . ....	119
Tabla 11-10: Tabla de incidencia de MWD y Hmo, caso Post- <i>Tsunami</i> . ....	119
Tabla 11-11: Componentes armónicas en el mar, 2011. ....	123
Tabla 11-12: Componentes armónicas en el río, 2011. ....	124

## **LISTA DE ECUACIONES**

Ecuación 2-1: Número de Iribarren.....	10
Ecuación 2-2: Evolución de rompiente. ....	10
Ecuación 6-1: Curtosis. ....	22
Ecuación 6-2: Desviación Estándar.....	23
Ecuación 6-3: Asimetría. ....	23
Ecuación 7-1: Expresión Espiral Logarítmica. ....	34
Ecuación 7-2: Expresión Espiral Parabólica. ....	35
Ecuación 7-3: Expresión de <i><math>\alpha_{min}</math></i> . ....	36

## **RESUMEN**

El presente proyecto se enfoca en analizar los cambios históricos de la línea litoral y las características morfodinámicas asociadas en la bahía de Lebu (38°S), Región del Bío-Bío, considerando especialmente los efectos del *tsunami* del 27 de Febrero de 2010. Para ello, se construyó una serie histórica de fotografías aéreas correspondiente al periodo entre 1984-2011, las cuales fueron georreferenciadas y digitalizadas para posteriormente aplicar ajustes logarítmicos y parabólicos a través del Sistema de Modelado Costero (SMC) de la Universidad de Cantabria. Se determinó el flujo medio de energía anual para obtener información del oleaje para casos antes y después del *tsunami* a través del software Steady-State Spectral Wave Model (STWAVE).

Considerando la geometría al sur de la ensenada, la espiral logarítmica de Yasso (1965) se ajustó de forma adecuada a la línea litoral para la serie histórica, determinando su configuración. El modelo parabólico adquirió una tendencia similar a la línea litoral, excepto en el sector sur, donde se observaron pequeños desajustes debido a la intrusión de agua en la desembocadura del río Lebu durante el *tsunami* del 27 de Febrero (27/F). El mejor ajuste fue presentado por este modelo con una tasa de acumulación promedio de 22.2 [m] a lo largo de la playa. Los ajustes de modelamiento costero para los 28 años de serie histórica de fotografías aéreas, se correlacionan mediante factores de oleaje y sedimentos, sin embargo, el *tsunami* del 27/F de 2010 modificó considerablemente la línea litoral, produciendo un avance por depositación sedimentaria.

Se concluyó que en el largo plazo, los cambios de la serie histórica se deben a los procesos litorales propios de la bahía, ya sean por cambios estacionales o por eventos de clima extremo como las tormentas. Con respecto al modelo parabólico de Hsu (1989), en el año 1984 existió un retroceso de -25.4 [m] y en 1993 un retroceso de -25.3 [m]. Una vez ocurrido el *tsunami* del año 2010 ha existido una alta variabilidad espacial de la línea litoral en el corto plazo, modificándola transcendentamente con un avance de 22.2 [m]. Así, se logró determinar que una vez culminado el *tsunami*, la condición en la bahía es de un estado de acumulación sedimentaria que en el mediano plazo está presentando características de equilibrio (retroceso de -14 [m] para el año 2011).

# 1. INTRODUCCIÓN

La evolución costera es el estudio de cómo y por qué las características y la posición de la línea de costa se han alterado, según lo dispuesto por Carter (1988). Además agrega que una escala temporal en la evolución costera es importante, donde es evidente que procesos tales como el abastecimiento sedimentario y su transporte hacia la costa puede variar en orden de varias magnitudes, a partir de factores naturales controlados por el clima y factores mediatizados por la actividad humana (cambio climático y nivel medio del mar). Entre estos cambios, destacan los terremotos y *tsunamis* que suelen generar importantes cambios en la morfología y dinámica de la costa.

Dentro de una evolución costera existen diversos factores que hay que tomar en cuenta, como son los estados de equilibrio y las escalas espacio-temporales. Carter (1988) expresa que una costa presenta diversas formas de comportamientos, dependiendo de escalas temporales y espaciales, estructuras geológicas, influencia tectónica, tipo de sedimentos, nivel del mar, procesos de olas y corrientes, y ambientes terrestres y oceánicos.

En este sentido, los cambios producidos en las costas chilenas por fenómenos naturales, como los *tsunamis*, alteran significativamente la morfodinámica de una playa, modificando, en algunos casos, su estado de equilibrio permanente, sin embargo, existe poco conocimiento científico sobre cómo un sistema costero se restablece considerando distintas escalas de tiempo, a pesar de la historia sísmica chilena que muestra una importante recurrencia de eventos sismo-*tsunami*. Por ende, es de suma importancia el estudio e investigación en las evoluciones costeras y de las líneas litorales.

Las formulaciones de los modelos de ajuste que determinan los cambios espacio-temporales de una línea de costa son elementos fiables para el estudio de las evoluciones costeras. Existen numerosos autores que desarrollan modelos numéricos sobre la base de la evolución costera, por medio de espirales matemáticas. Así, Yasso (1965) establece una espiral logarítmica con formulaciones de equilibrios de playa. Otros autores han discutido los parámetros que se deben utilizar para el empleo de los modelos, ya que dependen de la geometría de la zona, las condiciones de oleaje, fenómenos de difracción, refracción, espectros energéticos y de la localización de los puntos de control o polos de difracción.

Para identificar el procedimiento a utilizar en los modelos morfodinámicos, es necesario tener como conocimiento la forma de la línea litoral, las características geográficas que esta posee y verificar si existe algún saliente que produzca obstaculización en el oleaje y por ende difracción. El punto de control ubicado en la punta de la bahía genera difracción en el oleaje y, por consiguiente, la morfodinámica de la bahía.

Este proyecto se enfocará en el análisis de los cambios morfodinámicos y evolutivos de la línea litoral de la bahía de Lebu, por medio de diversas variables, tales como mareas, granulometría, transporte de sedimentos y oleaje, con el fin de cuantificar los cambios y los estados de equilibrio que la playa ha estado adquiriendo en el mediano y largo plazo.

Cabe destacar que los cambios de la línea litoral se determinaron mediante 28 años de una serie histórica de fotografías aéreas y el *tsunami* del 27 de Febrero de 2010, es un factor de cambio que influye en el estado de equilibrio de la línea litoral.

Una descripción de la bahía de Lebu y su geomorfología de la costa fue representada por Díaz-Naveas & Frutos (2010), en ella se señala que la línea de costa es suave, porque ha sido regularizada por acción del oleaje, ya que la terraza costera principal está compuesta de sedimentos blandos. Entre el acantilado y el mar, el litoral está ocupado por extensas playas, mares de dunas y lagunas litorales. Además describe que las costas entre Dichato y Lebu poseen una línea de costa oblicua-paralela muy desalineada de bahía en zeta y acantilado discontinuo.

Por su parte El Plan Regulador Comunal de Lebu (2003) expresa que el “borde costero presenta una morfología de acantilados, costas rocosas y playas de arena, que se intercalan desde la Punta Morguilla al Norte”. Según Araya-Vergara (1972), entre Lebu y Queule se presentan los cordones litorales más extensos que se encuentran regularizados por la acción del oleaje. Además, este autor expresa que la zona presenta hundimientos de 1,5 [m] dominados por la acción marina y la deriva litoral azotadas por incidencias cataclísmicas como el *tsunami*. Por otro lado señala que la costa recibe depositación de arena de los ríos Imperial y Toltén. Según lo anterior, la costa de la bahía de Lebu se encuentra afectada por condiciones de oleaje con puntas rocosas, indicador que señala un acorde entre la línea de costa y los modelos matemáticos según lo dispuesto por Martínez (2009).

Con el objetivo de analizar los cambios morfodinámicos y la evolución de la línea litoral de este sector, se dispone a utilizar los modelos parabólicos y logarítmicos del Sistema de Modelado Costero (SMC) con el fin de estimar una posible tendencia a los ajustes matemáticos. Sin embargo, la morfodinámica de las playas se verá afectada además, por procesos litorales como las dinámicas y transporte de sedimentos, según lo dispuesto por Medina *et al.*, (2001). Esta última se verificará mediante análisis de batimetrías en detalle y se calculará una grilla para la obtención del volumen transportado, sea por acreción o por erosión.

## **2. MARCO TEÓRICO**

Las costas de Chile poseen influencia tectónica y cambios dinámicos debido a encontrarse en una zona de subducción dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico que provocan actividad sísmica y volcánica (Martínez, 2009). Cuando los eventos sísmicos poseen magnitudes significativas con epicentros offshore, la generación de un *tsunami* será altamente probable, provocando cambios sustantivos y morfológicos en la línea de costa. Una evidencia de esto fue la modificación de la barra del Mataquito inducida por el *tsunami* del 27/F (Cienfuegos, 2011). El clima extremo de oleaje generado por el periodo invernal, también provoca modificaciones sustanciales en las zonas costeras.

Chile se encuentra afectado periódicamente por movimientos telúricos y posee en promedio un terremoto cada 10 años con una magnitud superior a 8 (Madariaga, 1998). Específicamente en la zona central del país es donde han ocurrido los de mayor magnitud según la escala de Richter. En el caso de la Región del Bío Bío, antiguamente han existido 2 sismos que han producido *tsunamis*, el de 1835 y 1939 (Lorca, 2010). El 27 de Febrero de 2010 hubo un terremoto de magnitud 8.8 grados, el cual generó un *tsunami* en las costas de Chile Central.

La Región del Bío Bío posee 54 comunas de las cuales 15 son costeras y se extiende por una línea de costa de aproximadamente 598 km (Comisión Regional de Uso del Borde Costero, 2006). Es por eso que esta zona en particular, es vulnerable a la acción del oleaje y a los efectos producidos por agentes selectivos, así como también por eventos de alta energía como son los *tsunamis*.

### **2.1 ZONA COSTERA**

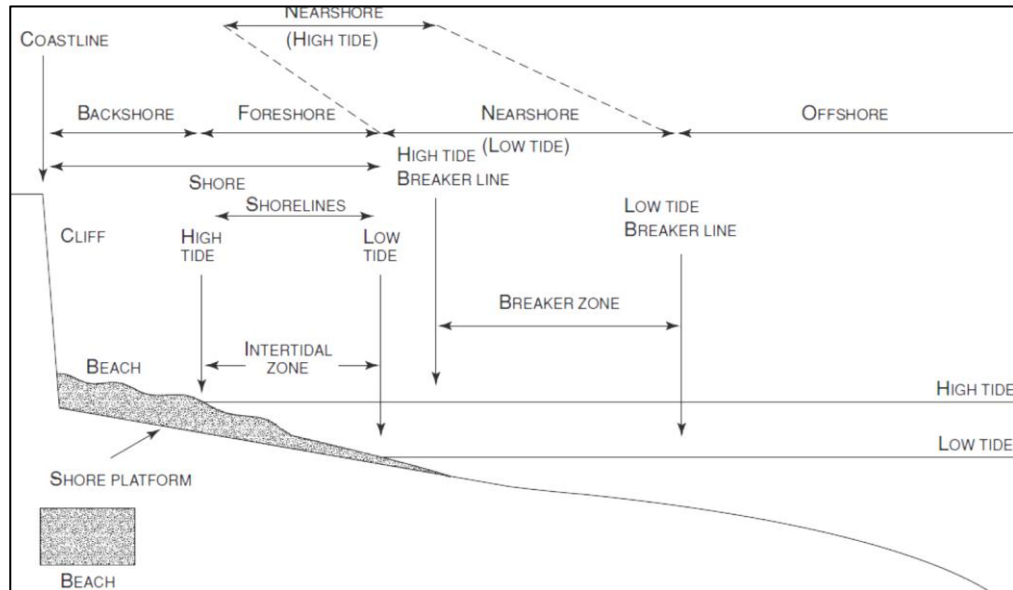
El término costa posee distintos significados según la línea investigadora y el autor. La costa es el lugar que comprende la interfase entre la tierra y el mar (Woodroffe, 2003). Por otro lado, la costa presenta un ancho variable abarcando la línea litoral y zona costera hasta el límite donde rompen las olas (Bird, 2008).

Por su parte, la Universidad de Cantabria desarrolla una nomenclatura en la cual especifica que la zona costera comprende entre la plataforma continental y el lugar donde se producen cambios y procesos morfodinámicos. Dentro del área estipulada se encuentran dunas, desembocaduras de río, efectos mareales, acción del oleaje y corrientes (G.I.O.C, 2001). El área de una zona costera dependerá netamente de las características geográficas, el clima de oleaje y en qué placa continental se encuentre. También se define zona costera como un área amplia de transición en donde los entornos terrestres influyen en entornos marítimos y entornos marítimos en entornos terrestres (Carter, 1988).

Dentro de ella se pueden abarcar distintas terminologías como la línea de costa (coastline) que según Bird (2008) es el borde de la tierra en el límite de altas mareas, marcado también por el límite de vegetación terrestre. Litoral (shoreline), en cambio, es el borde del agua que se mueve de un lado a otro de acuerdo con la pleamar y bajamar, de modo que exista un litoral para bajas, medias y altas mareas. Además, la

línea litoral es parte de la zona costera y es el borde de la zona de contacto con el mar que se encuentra en conexión con el continente (Martínez Reyes, 2009).

En la Figura 2-1, se especifican los términos empleados anteriormente.



**Figura 2-1: Representación de un tipo de franja costera.**

Fuente: (Bird, 2008).

## 2.2 SEDIMENTOLOGÍA

Un sedimento es el material fragmentado formado principalmente por la desintegración física y química de rocas de la corteza terrestre. Las propiedades de este son la densidad, porosidad, la forma, el tamaño, la velocidad de caída y el ángulo de reposo (Van Rijn, 1990).

Para la caracterización de un sedimento se deben poseer estudios, ya sean físicos, químicos o biológicos. Aquellos análisis describen de dónde puede provenir el material, el sistema de transporte y su medio ambiente de depositación (Vergara, 1991).

Dentro de la morfología costera se pueden destacar las playas, que son plataformas con acumulación evolutiva de sedimentos de corto, mediano y largo plazo. Ellas presentan comportamientos que dependen de su abastecimiento sedimentario y su transporte, respectivamente (Martínez Reyes, 2009). La playa es la acumulación de sedimentos que son depositados por la acción del oleaje (Short, 1999). Para los efectos sedimentológicos dentro de una playa deben existir 2 factores esenciales, las fuerzas generadas por el oleaje y el tipo de sedimento.

Según G.I.O.C (2001), la playa se sitúa entre la línea de máximo alcance del oleaje producido por un temporal y una profundidad, en donde los movimientos

sedimentológicos dejan de producirse debido a la acción del oleaje. Esa profundidad en la cual el sedimento deja de tener contacto con la ola incidente, y por tanto no existe turbulencia sedimentológica, se denomina cierre.

## 2.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos se encuentran afectados por diversos agentes forzantes que provocan movimiento, como las corrientes, el oleaje o la interacción de ambos. También el viento genera transporte en los sedimentos. Para este estudio en particular se empleará un análisis ocasionado por efectos del oleaje.

El transporte de sedimentos por oleaje dependerá de distintos factores, como la incidencia del frente de olas, el periodo de oleaje, el tamaño del grano, densidad, porosidad, etc. La velocidad del transporte depende de dichas características y de algún valor crítico según las interpretaciones establecidas por diversos autores. El transporte se mide mediante tasas de sedimentación que permite analizar la cantidad de sedimento trasladado.

El transporte de sedimentos es un proceso dinámico que genera cambios principalmente en las formas costeras a través de las olas y corrientes. Dependiendo de la granulometría y propiedades del fondo y las condiciones de flujo, se puede comportar como carga de fondo o por suspensión. Por su parte, G.I.O.C (2001) establece que existen 3 tipos de movimientos, rodadura y deslizamiento, saltación-suspensión.

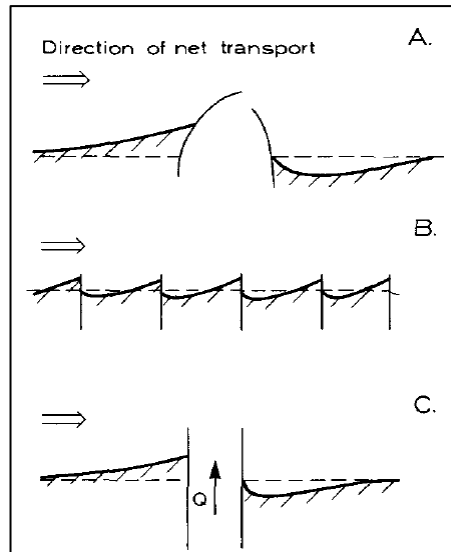
La dinámica de fluidos genera en el fondo cierta tensión de corte (velocidad de flujo) y el fondo recíprocamente genera fricción al fluido. De esta manera, cuando la velocidad del flujo supera la tensión de corte crítica se da inicio al movimiento, las partículas ruedan y se deslizan manteniéndose adheridas al fondo. En el caso que se presente transporte de sedimentos mediante saltación, recae principalmente por un aumento en la tensión de corte que presenta saltos en los sedimento formando una lámina fluido-sedimento. Cuando existe suspensión, se debe a que la velocidad de corte es excedida por la velocidad de caída del grano y las fuerzas turbulentas exceden el peso sumergido de las partículas del sedimento, provocando que aumente la altura del fondo marino (G.I.O.C, 2001). Cuando la velocidad es muy alta, el sedimento se mezcla con el fluido y se mueven como una sola masa, llamada fango fluido o *sheet flow*. Una vez que el sedimento se ha puesto en movimiento, el fluido ejerce fuerzas sobre el grano del lecho y éstas pueden llegar a ser movilizadoras o estabilizadoras (parámetro de Shields).

Por simplicidad de análisis, se reconocen 2 tipos de transporte de sedimentos en las playas:

- Transporte Longitudinal
- Transporte Transversal

El transporte longitudinal es inducido por una corriente paralela a la línea de costa que se produce en la zona interior, generada principalmente por el proceso de rotura de oleaje. El transporte transversal es debido a una corriente generada perpendicular a la línea de costa, ocasionada por la acción constante del oleaje (G.I.O.C, 2001).

El transporte longitudinal se manifiesta principalmente con deposición en la cara expuesta a la dirección de la corriente sobre alguna estructura. En el lado opuesto a la dirección del transporte se generará erosión. En la Figura 2-2 se representa la dinámica que presenta una playa con una obra marítima.

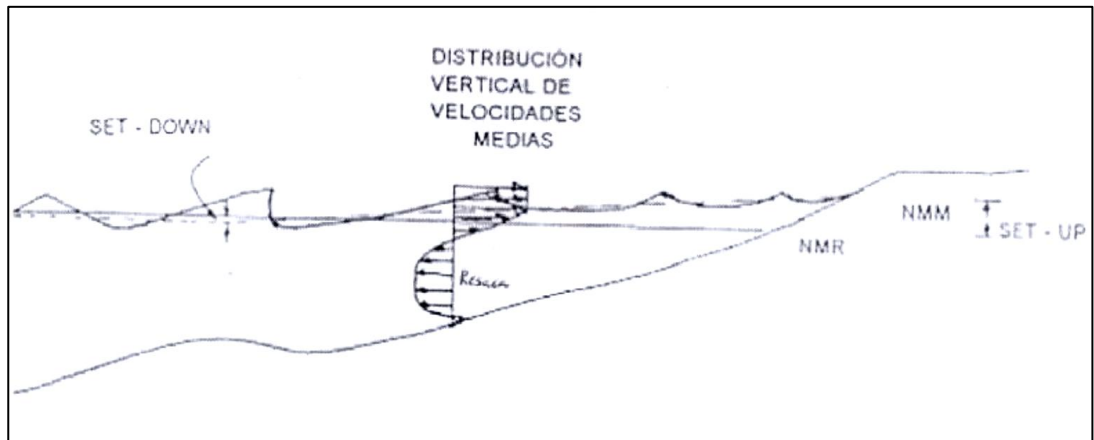


**Figura 2-2: Erosión y acreción en estructuras por transporte longitudinal.**

Fuente: Fredsoe & Deigaard (1994).

En el transporte transversal uno de los agentes con más ponderación es la corriente de resaca (corriente de retorno o undertow) que se origina principalmente en sectores donde se encuentra grandes concentraciones de turbulencia. Son generadas desde la orilla de la playa hasta la zona de rompiente, ya que es en ese lugar donde la concentración de energía es mínima para mantener el sedimento en suspensión. A medida que la corriente va aumentando su profundidad hacia aguas profundas, arrastra el sedimento hasta la zona de rotura, generando la barrera de procesos erosivos. Este proceso se realiza por la acción de la gravedad (García, 2003).

En la Figura 2-3 se representa la evacuación de las aguas de una playa por efecto de las corrientes de resaca.

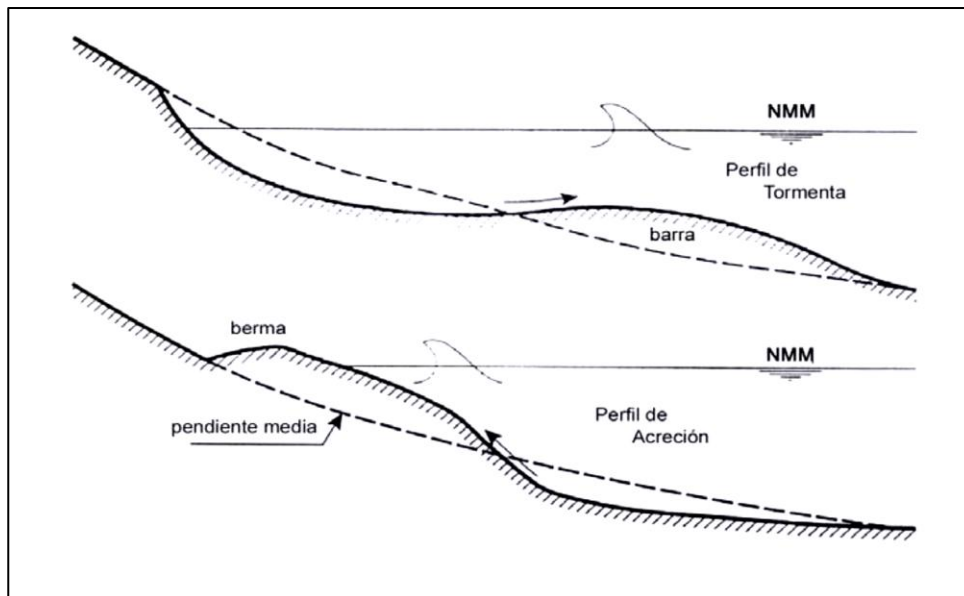


**Figura 2-3: Evacuación de aguas de la playa mediante corriente de resaca.**

Fuente: García (2003).

Dentro del transporte transversal, las tormentas inducen cambios fundamentales en las playas, arrastrando el sedimento del fondo, generando erosión y formando el perfil de tormentas. La recuperación del perfil de la playa se debe principalmente al perfil de acreción, en donde el oleaje actúa sobre los depósitos generados por una tormenta y los sitúa en la orilla nuevamente.

En la Figura 2-4 se representan la dinámica entre el perfil de tormentas y el perfil de acreción.



**Figura 2-4: Perfil de tormentas y de acreción.**

Fuente: García (2003).

## 2.4 MORFODINÁMICA

El término morfodinámica proviene de “morfo” y se define como forma y dinámica, es perteneciente o relativo a la fuerza cuando produce movimiento (RAE, 2001). Por lo tanto, la composición de esta palabra se refiere a los movimientos ejercidos por alguna fuerza que de alguna u otra manera presenta cambios físicos y espaciales. Se define morfodinámica como “el mutuo ajuste de la topografía y la dinámica de fluidos involucrados en el transporte de sedimentos” (Wright & Thom, 1977). De lo anterior, la morfodinámica en las zonas costeras tendrá efectos de agentes selectivos tales como el oleaje, corrientes y mareas. No obstante, existen otros factores que producen cambios como lo es el tipo y transporte de sedimento, sea longitudinal o transversal, tipo de costa y su batimetría, la zona y tipo de rompiente, tipo de ola, comportamiento post-rotura y el clima.

## 2.5 EVOLUCIÓN COSTERA

El estudio de las líneas litorales a nivel mundial se ha visto reflejado por el uso de modelos de evolución costera que determinan su variabilidad tanto espacial como temporal. Es así como diversos autores han interpretado por décadas, teorías relacionadas con el equilibrio de las bahías tanto en perfil como en planta. En un comienzo Yasso (1965) estableció como primera aproximación una espiral logarítmica como resultado de una forma en planta de una playa en equilibrio con oleaje incidente. Por su parte, Hsu (1989) mostró un nuevo ajuste a las curvas de líneas de costa en función de un modelo parabólico.

Actualmente existen numerosos estudios de evolución costera mediante diversos modelos numéricos como los realizados por Martínez *et al.*, (2009) que desarrollaron ajustes parabólicos y logarítmicos y métodos de superposición de la playa de la bahía de Concón para determinar los cambios asociados a la línea litoral. También existen autores que adoptan metodologías para obtener los coeficientes de la ecuación parabólica en playas de arena y grava como Schiaffino *et al.*, (2012). Por su parte Raabe *et al.*, (2009) establecen que el Sistema de Modelado Costero (SMC) es una herramienta para proyectos de ingeniería de costa con el uso de modelos parabólicos. Sin embargo, en la actualidad no existe información y desarrollos de evoluciones costeras por acción de un *tsunami* y la aplicación de modelos morfodinámicos en las líneas litorales. Es por ello que mediante la metodología de los autores anteriores, se dispuso a realizar un estudio que abarque la evolución de la línea de costa de la bahía de Lebu por medio de modelos numéricos y la relación conjunta que tiene la serie histórica de fotografías aéreas y la acción del *tsunami* del 27/F de 2010.

## 2.6 OLEAJE

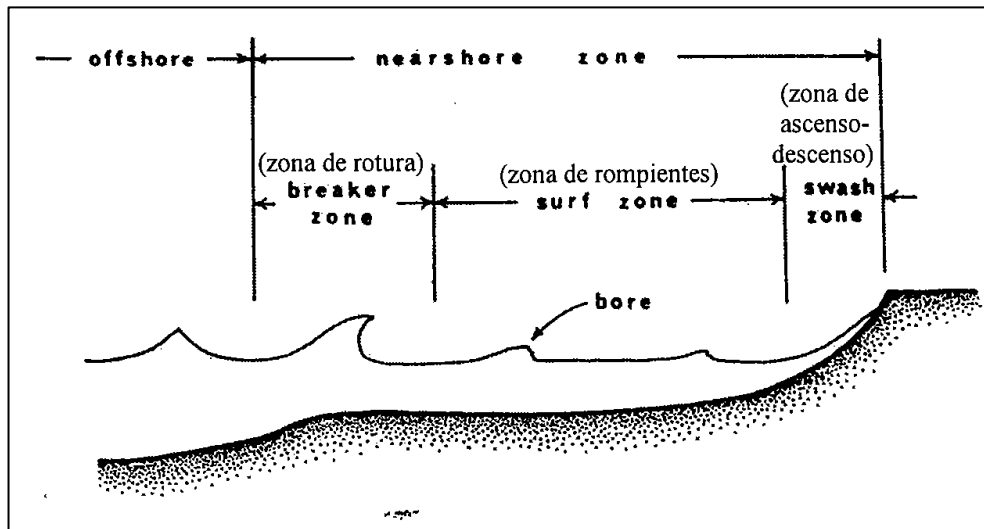
El oleaje es generado sobre la superficie del mar por el viento, que transfiere energía y provoca oscilaciones en la tensión normal y tangencial. De esta forma se generan ondas capilares que, al propagarse, se transforman en oleaje. Las olas al transferirse de zonas *offshore* a zonas someras presentan diversos cambios físicos, tales como refracción, difracción y asomeramiento, siendo esta última la causante de la

transferencia energética entre la ola y el fondo marino. De esta forma disminuye su longitud de onda y aumenta su altura a causa de la ley de la conservación de la masa, a medida que la profundidad disminuye (G.I.O.C, 2001).

En el momento que la ola siente el suelo marino, se genera una disipación de energía turbulenta, lo que ocasiona que el sedimento situado en el fondo sea puesto en movimiento. La zona donde se presentan mayores tasas de transporte de sedimentos y disipación de energía es en la zona de rompiente.

La zona de rompiente se define como el área interior en la que se propagan los bores producidos tras la rotura (G.I.O.C, 2001). El oleaje pone en suspensión gran parte del sedimento del fondo, que posteriormente podrá ser transportado por corrientes longitudinales o transversales. En cambio, zona de rotura es la zona interior en la que se produce la rotura del oleaje. El oleaje posee características no lineales, por lo que la zona de rotura será variable, según las propiedades del lugar y las condiciones climáticas que se afronte.

Mediante la Figura 2-5 se puede identificar la descripción de las zonas del perfil de una playa.



**Figura 2-5: Características del perfil de una playa.**

Fuente: G.I.O.C (2001).

Existen varios tipos de rotura de olas que se expresan en la Figura 2-6 (G.I.O.C, 2001). Dependiendo de parámetros físicos, tales como el número de Iribarren para alturas de ola  $H_0$  y  $H_b$  (altura inicial y de rotura, respectivamente) y la escala de rompientes, es como se determina qué tipo de rotura existe en la ola. En la Ecuación 2-1 se puede visualizar que los parámetros son la pendiente de la playa, la altura de ola y periodo respectivo. La Ecuación 2-2 contiene parámetros de amplitud y frecuencia angular.

Ecuación 2-1: Número de Iribarren.

$$I_r = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H_{0,b}}{L_{0,b}}}}$$

Ecuación 2-2: Evolución de rompiente.

$$\varepsilon = \frac{a_b \omega^2}{g \tan^2 \beta} = \frac{\pi}{I_{rb}^2}$$

De esta forma es como se delimitan y clasifican los tipos de rompientes.

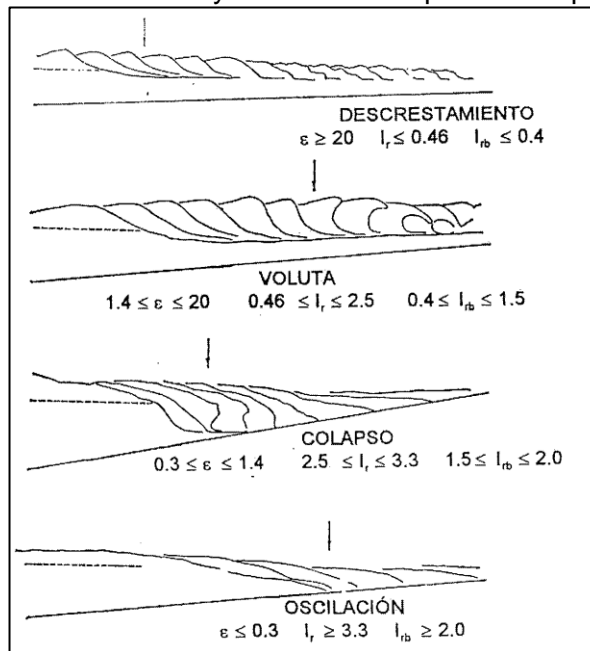


Figura 2-6 Tipos de rotura

Fuente: G.I.O.C (2001).

## 2.7 TSUNAMI

Un *tsunami* es un conjunto de ondas que se propaga con un periodo mayor a 20 [s] y puede llegar a obtener una longitud de 100 [km]. Es generado principalmente por efectos de perturbaciones sísmicas ocurridas en el mar. La concepción de un *tsunami* se presenta cuando la falla del sismo ocurre bajo o cerca del océano y debe crear un movimiento vertical de varios metros. (SHOA, 2010). Los efectos de un *tsunami* en las costas donde es generado pueden repercutir en la línea litoral y en el perfil de una playa causando erosión y depositación como ningún otro temporal los haya modificado. Poseen una energía sobredimensionada con respecto al clima extremo de oleaje típico de alguna zona costera. Cabe destacar que un *tsunami* es un agente destructivo de corto plazo que modifica las líneas litorales y su morfodinámica. Los cambios temporales y la evolución natural de la costa dependerán de las condiciones geográficas, meteorológicas y sísmicas del lugar, por lo que los efectos serán únicos para cada localidad.

### **3. ALCANCES**

Al efectuar un análisis morfodinámico en la bahía de Lebu, se consideró los efectos ocasionados por el *tsunami* del 27 de febrero del 2010. Cabe destacar, que el estudio se enfocó a un análisis sedimentario con modelaciones numéricas y solo se utilizarán los efectos producidos por el *tsunami* en la línea de costa y no su generación y su propagación.

El proyecto está orientado solo a efectuar análisis de carácter morfodinámico de un sistema de playa, incluyendo su morfología y transporte de sedimentos, mediante la aplicación de métodos de gabinetes, modelaciones numéricas y datos de terreno que son aportados por la Dra. Carolina Martínez de la Universidad de Concepción, a través del proyecto FONDECYT N° 11100379 (2010-2013).

### **4. OBJETIVOS**

#### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar los cambios históricos de la línea litoral y las características morfodinámicas asociadas en la bahía de Lebu, Región del Bío Bío.

#### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

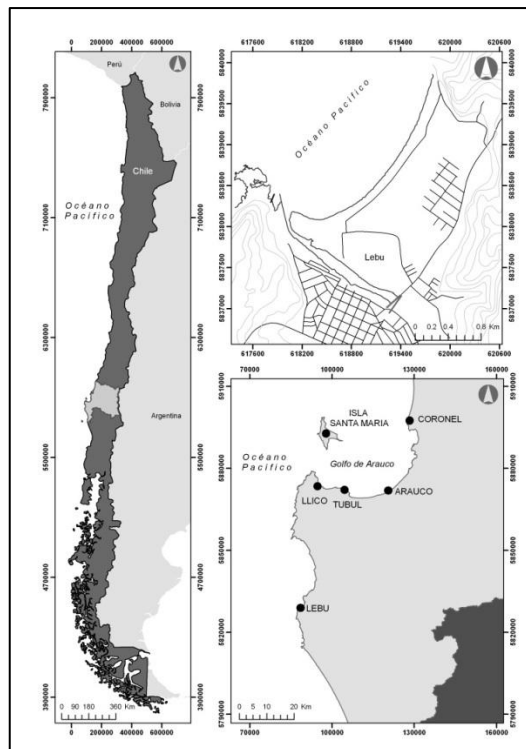
1. Determinar los cambios en planta y en perfil de la bahía de Lebu para diferentes escalas espacio-temporales a través de funciones de ajuste.
2. Caracterizar las condiciones de oleaje asociadas al flujo medio de energía anual.
3. Analizar los procesos morfodinámicos asociados a la variabilidad de la línea litoral.
4. Determinar los efectos del tsunami del 27/F de 2010 en los cambios de la línea litoral de la bahía de Lebu.

## 5. CAMPAÑA DE TERRENO

Los parámetros, materiales y datos necesarios para el estudio fueron otorgados por la Doctora Carolina Martínez de la Universidad de Concepción para diferentes periodos de análisis. Estos valores fueron medidos en trabajos de terreno realizados en la bahía de Lebu posteriores al *tsunami* del 27/F de 2010. Personalmente se viajó a la campaña de Febrero del año 2012, de los cuales se lograron obtener diversos parámetros. Cabe mencionar que para los datos de sedimentología, hubo una constante secuencia de muestras para distinguir los cambios que se produjeron en el área.

### 5.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO

El lugar de estudio corresponde a la bahía de Lebu, ubicada en la VIII Región del Bío Bío a 145 [Km] al sur de Concepción (Figura 5-1). Lebu es la capital provincial de Arauco y geográficamente abarca 562,9 [km<sup>2</sup>] que representa 1,52% de la superficie regional. Su costa se encuentra regularizada, siendo la influencia del mar el factor principal en su evolución. Esto se debe a la existencia de cordones litorales que determinan una costa pareja en su extensión. La tendencia de este tipo de costa es al hundimiento, por lo que genera la creación de ambientes estuariales con formaciones clásticas y blandas que permiten la incidencia cataclísmicas de *tsunamis* (Araya-Vergara, 1985).



**Figura 5-1: Lugar de Estudio.**

Fuente: Grupo de Geografía, UdeC.

## 5.2 BATIMETRÍA Y LÍNEA DE COSTA

Para los cambios espaciales que se produjeron en la bahía de Lebu a causa del *tsunami*, fue necesaria la utilización de diferentes batimetrías, una antes del fenómeno y otra posterior. Para la condición pre-*tsunami* se recurrió a la carta náutica N° 6131 disponible por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), la que fue procesada mediante el software Didger 3 y Surfer 8 para construir un modelo digital de terreno.

Para el caso de post-*tsunami* se dispuso de una batimetría en detalle realizada por el equipo de Geografía de la Universidad de Concepción, y la cooperación de pescadores artesanales de la zona. Los datos se obtuvieron mediante un transductor de doble frecuencia y un GPS interno (Figura 5-2), el cual elabora un mapa de deslizamiento del fondo mostrando las desnivelaciones que el lecho posee. Además otorga la velocidad a la cual la embarcación trabaja, condición importante al momento de realizar la batimetría, puesto que a mayor velocidad las ondas emitidas por el transductor no son devueltas con exactitud, por lo que los datos entregados no serán significativos. Cabe destacar que los datos de profundidad fueron obtenidos cada 10 [s] con una grilla de 20 [m] en la fecha de Febrero de 2012.



**Figura 5-2: Garmin GPSMAP 421s Combo Dual Transductor.**

Fuente: (Marine Wholesales, 2009)

Las referencias geográficas se adquirieron por medio de GPS geodésico modelo R4, uno de doble frecuencia que funciona con un GPS móvil. El receptor trabaja como una base que está posicionado sobre una coordenada conocida y así dará exactitud a los resultados que se generarán en el GPS móvil. Esta coordenada conocida se extrajo de la Red Geodésica Local que se construyó con el Proyecto FONDECYT N° 11100379 dado que los vértices locales fueron destruidos por el terremoto del 27/F de 2010.

Las líneas de costa y la batimetría que se obtuvieron en la salida de terreno, fueron realizadas por medio del GPS móvil recorriendo detalladamente toda el área de estudio. Luego esos valores son extraídos y analizados mediante un software interno del producto. Véase Figura 5-3. Cabe destacar que las mediciones fueron corregidas por marea y oleaje, y referidas al NRS.



**Figura 5-3: GPS Tramin (izquierda). GPS doble frecuencia (derecha). Proceso de batimetría con GPS móvil (abajo).**

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3 MAREAS

La influencia de la Luna y el Sol sobre la Tierra son las principales causantes de la marea. Sin embargo, la Luna es el astro predominante debido a que se encuentra más cercano a la Tierra, por lo que el Sol, independiente de su masa, será solo la mitad de la marea lunar por encontrarse a millones de kilómetros de distancia. Cuando la Luna se encuentra llena o nueva, la marea adquirirá valores máximos llamadas mareas de sicigia.

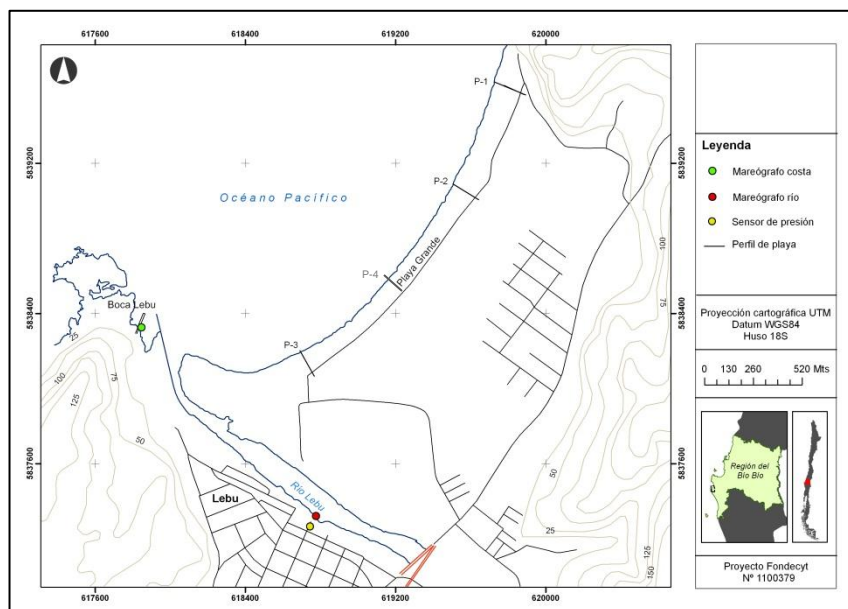
Los análisis de marea dentro del estudio se efectuaron para obtener resultados de las desnivelaciones del mar tanto en las zonas someras como en aguas interiores del río Lebu. Además, conocer la interacción mar-río que ocurre en la desembocadura a causa de los agentes armónicos y su implicancia en el transporte de sedimentos en la bahía. Paralelamente se verificó la densidad espectral para ambos casos y de esta forma analizar su peak de energía.

Para cerciorar los cambios del nivel medio del mar o diferencias topobatimétricas en el fondo, se efectuó una comparación mareal en 2 campañas de terreno, una realizada el 17 de Marzo de 2011 y la otra el 16 de Diciembre de 2011 hasta el 16 de febrero de 2012.

Luego del terremoto y posterior *tsunami* del 27/F de 2010 los niveles topográficos y batimétricos tuvieron variaciones importantes en la bahía, por lo que se tuvo que medir las desnivelaciones del mar por un periodo mínimo de 30 días, según como lo establece el SHOA en la publicación N° 3109.

En la Figura 5-4 se puede apreciar la localización geográfica de los mareógrafos en la bahía de Lebu.

Debido a la existencia de un río en la bahía de Lebu, se presentan diversos fenómenos dinámicos, tales como la intrusión del agua de mar río arriba que dependerá de los factores astronómicos, como la posición directa de la Luna, Tierra y Sol. También el río al desembocar se verá modificado por el agua marina, en donde se apreciarán cambios periódicos en sus desnivelaciones. Es por ello que la localización del sensor del mar se encuentra en el malecón donde se sitúan los pescadores artesanales, debido a la protección que esta entrega sobre la dinámica del río y el mar. Los valores entregados por los sensores de presión en este lugar serán más representativos que si se situaran cerca de la desembocadura y posterior pluma de corriente del río.



**Figura 5-4: Localización de Mareógrafos y perfiles, Lebu.**

Fuente: Proyecto FONDECYT N°1100379

La Figura 5-5 indica el proceso de instalación de los sensores de presión en el mar y en el río.

El instrumento que se utilizó para las mediciones de marea, fueron sensores de presión (Figura 5-6) que permitieron obtener el nivel medio del mar (NMM) y el Nivel de Reducción de Sondas (NRS). Estos sensores modifican la magnitud física de presión según las desnivelaciones que el mar establezca. Es por eso que se deben posicionar a presión atmosférica para que el sensor pueda describir de mejor forma las variaciones. Luego para exportar los datos obtenidos por el sensor, se procedió a utilizar HOBO Optic USB Base Station (Figura 5-7), que descarga el registro de datos con una interfaz USB óptica.

Los sensores se programaron para medir cada 5 minutos por un periodo superior a los 30 días, para verificar y completar el ciclo lunar. El rango de altura que este sensor midió fue desde 0 a 10 [m]. El periodo de medición fue desde el 18 de Marzo de 2011 hasta el 19 de Abril de 2011.



**Figura 5-5: Instalación de mareógrafos para fondeo en el mar (izquierda) y en el río (derecha).**

Fuente: Grupo de Geografía de la UdeC.



**Figura 5-6: HOBO UB-20.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 5-7: Óptica estación Base.**

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.1 MAREA ARMÓNICA

Para la obtención de los datos armónicos se utilizó mediante el software *Matrix Laboratory* (MATLAB) en su versión 7.8.0 (r2009a), un algoritmo *t\_tide.m* que obtiene todas las constituyentes armónicas, más otros parámetros como frecuencia, amplitud y flujos residuales, de acuerdo a lo desarrollado por Pawlowicz (2011).

Para la clasificación del tipo de mareas es necesario tener como conocimiento los valores armónicos principales (Tabla 11-11, Anexo Mareas) y determinar en que rango se encuentra el régimen mareal mediante el coeficiente determinante del régimen de mareas (Courtier, 1992). Las componentes son:

- M2 : Componente lunar principal semidiurna
- K1 : Componente lunisolar declinación diurna
- O1 : Componente lunar declinación diurna
- S2 : Componente solar principal semidiurna

Según Courtier (1992) existen 4 tipos de mareas, las diurnas, semidiurnas, mixtas diurnas y mixtas semidiurnas. Por medio del coeficiente es posible determinar el régimen mareal de una zona en específico.

### 5.3.2 MAREA NO ARMÓNICA

Para determinar los parámetros necesarios y establecer un análisis del comportamiento de mareas es menester recurrir a la publicación N° 3202 del SHOA. En ella se especifican los planos de referencia de la marea, los cuales son:

- Nivel Medio del Mar
- Nivel Medio de la Marea
- Altura Media de la Pleamar
- Altura Media de la Pleamar más Alta
- Altura Media de la Bajamar
- Altura Media de la Bajamar más Baja
- Nivel de Reducción de Sondas (NRS)

Paralelamente se obtiene el Rango Medio de Marea como el Rango de la Marea en Sicigia.

Para el cálculo de estos parámetros, se utilizó el software Microsoft Excel, en el cual se desarrolló un algoritmo automatizado con las formulaciones de la publicación. Además se seleccionaron todas las pleamares del mes como también todas las bajamares para así establecer una expresión de como se representan las desnivelaciones extremas en la bahía.

## 6. EVOLUCIÓN SEDIMENTARIA

### 6.1 DESCRIPCIÓN GRANULOMÉTRICA

El estudio y análisis temporal de los granos que componen una playa en un área determinada permite obtener parámetros significativos sobre la evolución sedimentaria e inferir la tendencia que este posee. Para determinar tales cambios, se realizaron análisis longitudinales y transversales a lo largo de la Playa Grande en la bahía de Lebu. Además se confeccionaron curvas granulométricas de las muestras de cada perfil para representar el tipo de sedimento que contiene el lugar.

La clasificación del tipo de sedimento se efectuó mediante la escala de Udden & Wentworth (1922), representada en la Tabla 6-1.

**Tabla 6-1: Escala granulométrica de Udden & Wentworth (1922).**

Nº Tamiz	Diámetro [mm]	Clasificación
Nº 5	4	Grava Fina
Nº 10	2	Grava Muy Fina
Nº 16	1	Arena Muy Gruesa
Nº 40	0,5	Arena Gruesa
Nº 60	0,25	Arena Mediana
Nº 115	0,125	Arena Fina
Nº 250	0,0625	Arena Muy Fina

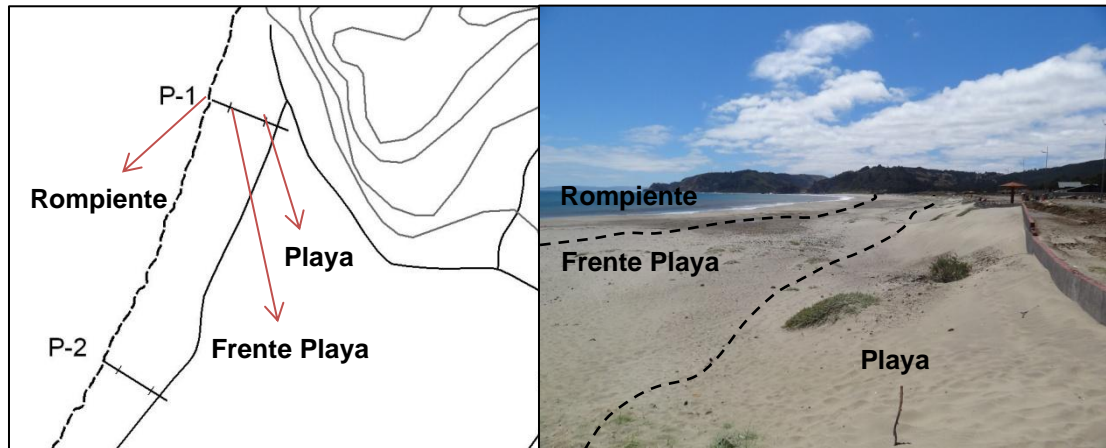
Fuente: Elaboración propia.

#### 6.1.1 ÁREA DE MUESTREO

El estudio granulométrico se realizó en 4 perfiles a lo largo de la playa para posteriormente realizar análisis transversales como longitudinales. Es por esto que se optó por extraer sedimentos con grillas que abarquen desde el río hasta el norte de la playa. En la Figura 5-4 se especifican los perfiles realizados. Cada perfil contiene 3 muestras transversales: Playa, Frente Playa y Rompiente, las cuales se especifican en la Figura 6-1.

El proceso de toma de muestras se realizó en condiciones de bajamar, ya que de esta manera es posible alcanzar zonas más lejanas a la línea de costa. Al momento de extraer los sedimentos se procuró que las muestras fueran superficiales a no más de 10 [cm] de profundidad para que los resultados sean significativos y no alterados por otros agentes.

Para el proceso de muestras de sedimentos se necesitó bolsas herméticas para aislar el paso de aire, agua y no altere la composición tanto física, química y biológica del grano.



**Figura 6-1: Muestras a lo largo de los perfiles.**

Fuente: Elaboración propia.

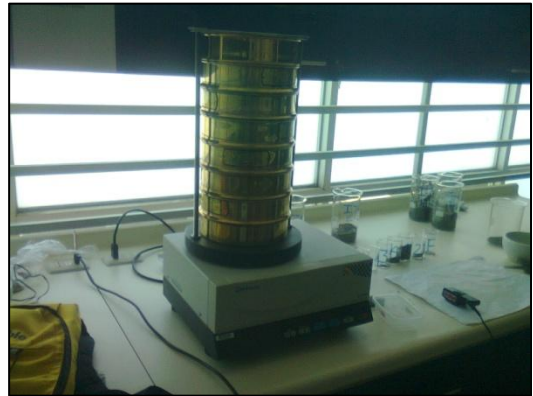
### 6.1.2 HERRAMIENTAS Y PROCESO DE TAMIZADO

Una vez ya obtenido el sedimento de cada muestra para cada uno de los perfiles se procede a eliminar los restos orgánicos que normalmente se encuentran en ellos. Las muestras fueron divididas en vasos precipitados para introducirlos a una máquina secadora duración 24 [horas].

Posteriormente, cada muestra es extraída y analizada con una lupa para verificar si existen elementos no significativos que alteren los resultados al momento de tamizar. No obstante, antes de realizar ese procedimiento se pesó, mediante una balanza digital, cada muestra para obtener 100 [gr] aproximadamente y así analizar de forma correcta la granulometría del lugar.

Posteriormente se procede a ejecutar la máquina tamizadora que clasificará los sedimentos según su tamaño. Los números de tamices son 5, 10, 16, 40, 60, 115 y 250. El tiempo de vibración de la mesa para cada malla fue de 10 minutos, periodo necesario para que exista una segregación correcta del sedimento.

La Figura 6-2 expone los instrumentos utilizados para el proceso de tamizado.



**Figura 6-2: Balanza digital (arriba); Vasos precipitados (izquierda); Maquina Tamizadora (derecha).**  
Fuente: Elaboración propia.

## 6.2 DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA

El diámetro del grano permite obtener diversos análisis sedimentológicos, pero para analizar su dinámica según el medio es necesario conocer sus condiciones de distribución.

Los diámetros granulométricos usados comúnmente son el  $d_{10}$ ,  $d_{30}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$  y  $d_{90}$ . Por el contrario, los diámetros necesarios para un análisis estadístico y el posterior cálculo de sus indicadores son el  $d_5$ ,  $d_{16}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{75}$ ,  $d_{84}$  y  $d_{95}$ .

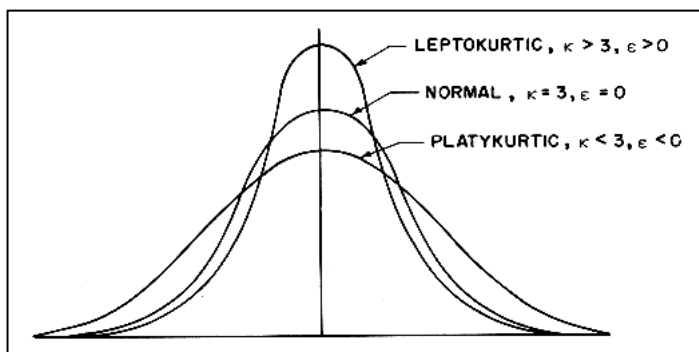
Los indicadores estadísticos que se utilizaron para clasificar el tipo de sedimento se calcularon mediante el análisis de Vergara (1991) y son los siguientes:

**Curtosis (K):** Es el indicador que caracteriza el apuntalamiento de la distribución de los sedimentos. Se clasifica en 3 rangos, Leptocúrtica, Mesocúrtica y Platicúrtica, de lo cual se calcula de la siguiente manera:

**Ecuación 6-1: Curtosis.**

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

En la Figura 6-3 se expresa la curva de distribución de frecuencias para la curtosis.



**Figura 6-3: Curvas de apuntalamiento.**

Fuente: (© Unesco, 2012).

La escala cualitativa para los sedimentos quedó regularizada de la siguiente manera:

[0.67 / 0.90] = Platicúrtica.

[0.90 / 1.11] = Mesocúrtica.

[1.11 / 1.50] = Leptocúrtica.

[1.50 / 3.00] = Muy Leptocúrtica.

[> 3.00] = Extremadamente Leptocúrtica.

**Desviación estándar ( $\sigma$ ):** Indicador estadístico que representa la clasificación de los sedimentos, siendo bien, poco y mal clasificado. Se calcula con la ecuación representada a continuación:

**Ecuación 6-2: Desviación Estándar.**

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

La clasificación dependerá de los resultados del indicador y para ello se utilizó la siguiente escala cualitativa:

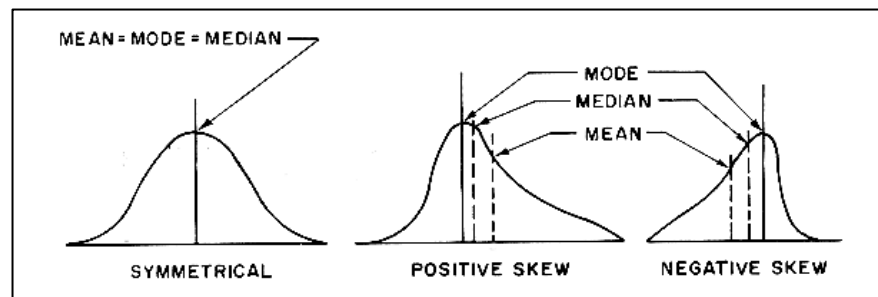
- [< 0.35] = Muy bien Clasificada.
- [0.35 / 0.50] = Bien Clasificada.
- [0.50 / 1.00] = Clasificación Moderada.
- [1.00 / 2.00] = Poco Clasificada.
- [2.00 / 4.00] = Mal Clasificada.
- [>4.00] = Muy mal Clasificada.

**Asimetría (SK):** Es la distribución de las frecuencias en los diámetros de los sedimentos que pueden clasificarse como simétrico, asimétrico a la izquierda y asimétrico a la derecha. El cálculo se efectuó con la siguiente ecuación:

**Ecuación 6-3: Asimetría.**

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

En la Figura 6-4 se representan las curvas de asimetría y su distribución según sus frecuencias.



**Figura 6-4: Curvas de Asimetría.**

Fuente: (© Unesco, 2012).

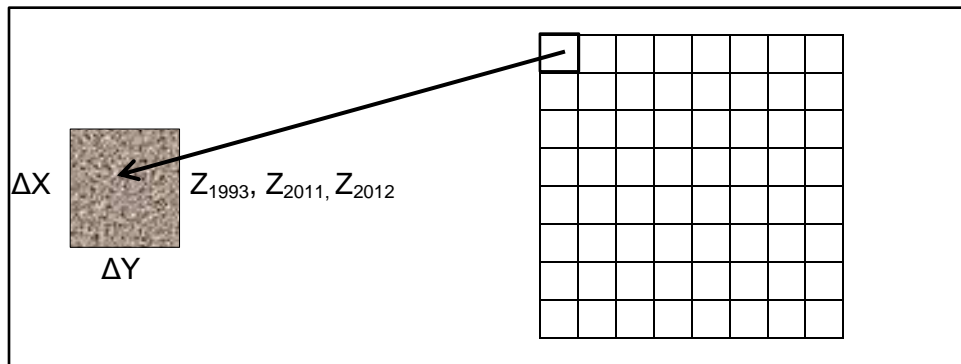
La clasificación adoptada para los sedimentos es:

- [1.00 / -0.30] = Alto exceso de gruesos.
- [-0.30 / -0.10] = Moderado exceso de gruesos.
- [-0.10 / +0.10] = Simétrica.
- [+0.10 / +0.30] = Moderado exceso de finos.
- [+0.30 / +1.00] = Alto exceso de finos.

### 6.3 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Esta sección especifica el método de cálculo del transporte de sedimentos real en la bahía de Lebu, usando batimetrías de diferentes años para cuantificar los  $[m^3]$  del evento del 27/F de 2010 y así comparar con un análisis posterior. Los años en estudio son 1993, 2011 y 2012, los que corresponden a las cartas náuticas y post levantamientos respectivamente.

De esta forma se analizó el primer caso que fue antes del evento y se denominó *pre-tsunami*. Se utilizó la carta náutica N°6131 del SHOA con fecha de 1993 y la batimetría de Junio de 2011. El cálculo se realizó con el software STWAVE elaborando una grilla con dimensiones de  $\Delta X$  y  $\Delta Y$  igual a 2[m] para cada batimetría (Véase Figura 6-5). De esta forma se prosigue a realizar el producto de la profundidad con la celda especificada para obtener un volumen  $[m^3]$  para cada punto batimétrico.



**Figura 6-5: Método de Cálculo en el Transporte de Sedimentos.**

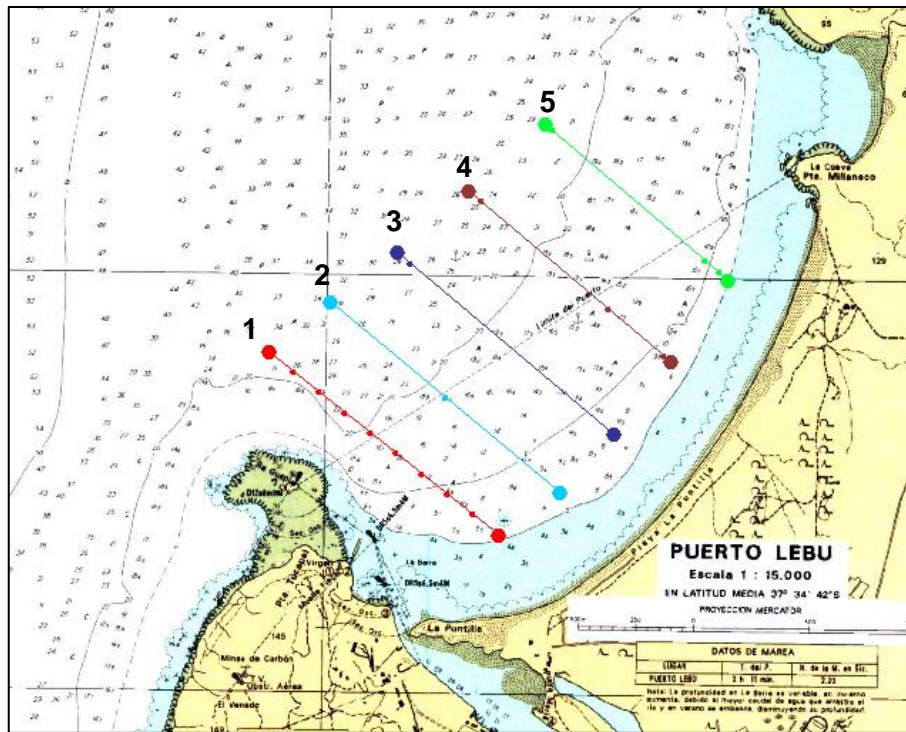
Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el volumen de cada celda para cada batimetría, se cuantifica la diferencia entre las 2 mediciones para cada punto, es decir,  $\Delta X \cdot \Delta Y \cdot Z_{2011} - \Delta X \cdot \Delta Y \cdot Z_{1993}$ . De esta manera, si los valores resultantes son positivos el transporte de sedimento tenderá a la erosión, por el contrario, si son negativos existirá acreción. Esto debido a que se considero la profundidad positiva.

El otro caso ha analizar fue después del evento y se denominó *post-tsunami*. El procedimiento es idéntico al anterior solo que la diferencia entre las 2 mediciones para cada punto fue  $\Delta X \cdot \Delta Y \cdot Z_{2012} - \Delta X \cdot \Delta Y \cdot Z_{2011}$ .

Para representar los cambios morfodinámicos de la bahía se trazaron perfiles transversales mediante el software STWAVE, según lo estipula la Figura 6-6. Cada perfil contiene las batimetrías de los años 1993, 2011 y 2012 para de esta forma cuantificar la evolución de los perfiles y verificar en que sector existe acreción o erosión y así posteriormente corroborar con los cambios de la línea litoral.

La línea roja, celeste, azul, café y verde representan los perfiles 1, 2, 3, 4 y 5 respectivamente.



**Figura 6-6: Representación de Perfiles.**

Fuente: Elaboración propia.

### 6.3.1 CONDICIÓN DE PLAYA EN EQUILIBRIO

La implementación de modelos morfodinámicos en las playas requiere la identificación de su estado de equilibrio, debido al criterio de si el transporte de sedimento es nulo o existe volumen desplazado. Es por eso que existen 2 tipos de condiciones de playa en equilibrio, la estática y la dinámica.

Si una playa no varía su planta bajo la acción del oleaje se entiende que existe una playa en forma de planta de equilibrio, además si presenta un nulo transporte de sedimentos será una playa de equilibrio estático G.I.O.C (2001). Si existe transporte longitudinal de sedimentos es una playa en equilibrio dinámico, si cesa el transporte pasa a ser una playa de equilibrio estático.

Por su lado Medina *et al.*, (2001) expresan que una playa en equilibrio queda definida como su perfil en equilibrio, su planta en equilibrio y su granulometría en equilibrio. Es por ello la importancia en definir el estado de equilibrio de las playas para la posterior aplicación del modelo morfodinámico y su análisis de evolución de la línea litoral.

En el caso del perfil en equilibrio se analizó si existe un aumento o disminución de la profundidad relativo a las batimetrías. En el caso de la planta en equilibrio se emplearán diversas formulaciones empleadas en el SMC.

### 6.3.2 IMPLEMENTACIÓN FOTOGRAFÍAS AÉREAS

El uso de una serie histórica de fotografías aéreas permite comparar cuantitativamente los cambios en planta de una bahía y las evoluciones de las líneas litorales. De esta forma se dispone de cartografía histórica del SHOA y fotografías aéreas e imágenes satelitales de los años 1984, 1993, Marzo 2010 y Junio de 2011. Por lo cual se elaboró una escala temporal de 28 años. Cabe distinguir que el manejo geodésico y de georreferenciación de las imágenes fue otorgado por la Dra. Carolina Martínez de la Universidad de Concepción (Proyecto FONDECYT N° 11100379)

La implementación de la variabilidad de las líneas litorales se enfoca principalmente para corroborar un posible ajuste matemático mediante el software SMC y definir una posible tendencia hacia el retroceso o avance de la línea de costa.

## 7. DESCRIPCIÓN MODELACIÓN NUMÉRICA

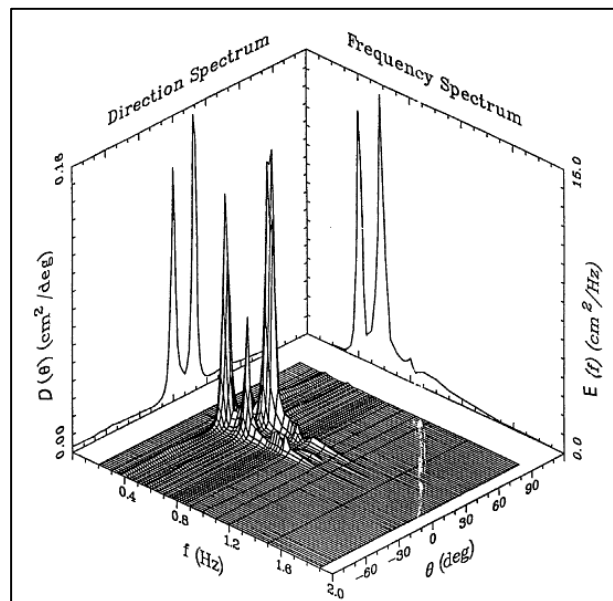
### 7.1 MODELO DE PROPAGACIÓN DE OLAJE

#### 7.1.1 CONDICIONES ESPECTRALES DEL OLAJE

La dinámica de la superficie del mar presenta un máximo de energía entre periodos de 2 a 20 [s] que a su vez son clasificadas como ondas de gravedad generadas por viento. La energía va perdiendo potencial a medida que se va acercando a la costa donde comienza a disiparse por efectos de asomeramiento para posteriormente romper. Este movimiento se denomina Oleaje (G.I.O.C, 2011).

La distribución de un espectro de oleaje depende de las condiciones de generación; velocidad del viento, fetch, tiempo de generación y batimetría como también por las interacciones entre ola y ola, disipación de energía y fricción en el fondo (G.I.O.C, 2001).

Un espectro bidireccional representa las condiciones de oleaje provenientes de todas las direcciones y todas las frecuencias, como también la información de la densidad espectral de energía. Relaciona parámetros de altura, periodo y dirección lo que hace que sea una de las maneras más completas de definir el oleaje. En la Figura 7-1 se representa un espectro direccional de oleaje con 2 peak en su distribución de energía denominado bimodal



**Figura 7-1: Espectro direccional de oleaje.**  
Fuente: (Coastal Engineering Manual, 2002).

### 7.1.2 STEADY-STATE SPECTRAL WAVE MODEL (STWAVE)

Se utilizó un modelo para la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras. La determinación de los cambios cuantitativos de la altura de ola, dirección y la forma espectral en la bahía de Lebu se realizaron mediante el software Steady-State Spectral Wave Model (STWAVE), el cual es un modelo de diferencias finitas basado en la ecuación de equilibrio por acción de una ola. En él se pueden simular espectros de olas irregulares, la refracción inducida por la profundidad, shoaling, rotura inducida por pendiente, difracción, el crecimiento por viento e interacción de ola-corriente. El criterio de rotura es el de Miche (1951) el cual establece un límite máximo en la altura de ola de momento cero para cada profundidad. En el caso de la refracción y shoaling, el modelo genera solo procesos lineales con subestimaciones de altura de ola. La difracción es incluida a STWAVE utilizando la energía de una frecuencia dada y las direcciones incidentes, mediante una aplicación numérica.

El modelo presenta diferentes consideraciones generales y específicas que hay que tener en cuenta al momento de ejecutarlo. Entre ellas:

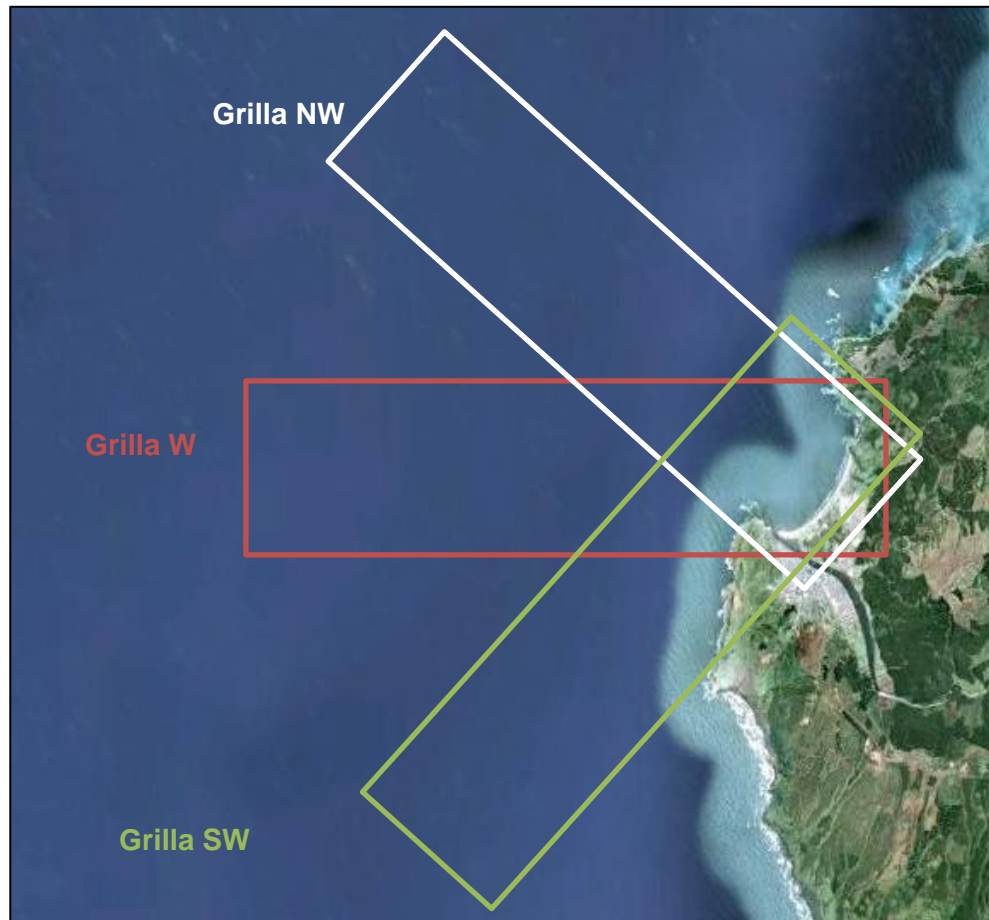
- Pendiente suave (Mild Slope): Al propagar oleaje en batimetrías no regulares se presentan complicaciones en las condiciones de contorno. En la década de los 70 se estudió la propagación de ondas para pendientes suaves y variables, destacando la simplificación de la ecuación tridimensional de Laplace a una bidimensional (Berkhoff, 1972)
- Condiciones de inicio de oleaje homogéneas: El modelo restringe que la grilla principal debe comenzar en aguas profundas.
- Fricción del fondo despreciable
- Refracción, difracción y tensores de radiación son lineales.

### 7.1.3 METODOLOGÍA DE TRANSFERENCIA DE OLAJE

La transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras fue realizada aplicando las 2 batimetrías en estudio. Un caso *pre-tsunami* utilizando cartas náuticas en aguas profundas a lo largo de la bahía de Lebu y un levantamiento batimétrico realizado en Marzo de 2012 en el caso *post-tsunami*.

La transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras se realizó mediante el método semipurista que consiste en transferir el espectro 2D de energía en 2 cuadrantes (3<sup>er</sup>o y 4<sup>to</sup>) con diferentes direcciones en las grillas (Tabla 7-1). Posteriormente se transfiere las olas de forma independiente para obtener el espectro en aguas someras y así construir las funciones de transferencia de todos los modelos (Nicolau del Roure, 2004).

La Figura 7-2 representa la orientación de las grillas utilizadas en el método semipurista.



**Figura 7-2: Orientación de grillas para transferencia semipurista.**  
Fuente: Elaboración propia.

A cada modelo se le incorporó 2 grillas, una pequeña que abarca toda la bahía y que tendrá como características una dimensión de 25 x 25 [m]. La otra se prolongó hasta aguas profundas y poseerá una resolución de 150 x 150 [m]. Luego se anidó la grilla pequeña a la grande para establecer una mejor solución en los resultados del modelo numérico.

En la Tabla 7-1 se muestran las direcciones de oleaje simuladas para cada una de las grillas construidas.

**Tabla 7-1: Modelos con direcciones propagadas.**

<b>Modelo</b>	<b>Dirección de incidencia [°]</b>
SW	202.5 225
W	247.5 270 292.5
NW	315 337.5

Fuente: Elaboración propia.

Cada grilla de los modelos utilizados, tuvo diferentes direcciones matemáticas dependiendo de la orientación que posee, esto para que la propagación del oleaje desde aguas profundas a aguas someras se realice de forma correcta.

**Tabla 7-2: Direcciones para cada grilla.**

<b>Modelo</b>	<b>Dirección Grilla principal [°]</b>	<b>Dirección grilla pequeña [°]</b>
SW	45	45
W	0	0
NW	315	315

Fuente: Elaboración propia.

La configuración de espectros para la dirección 202.5 [°] del modelo SW, se denota en la Tabla 7-3. Cabe destacar que el procedimiento se realizó para las otras 6 direcciones.

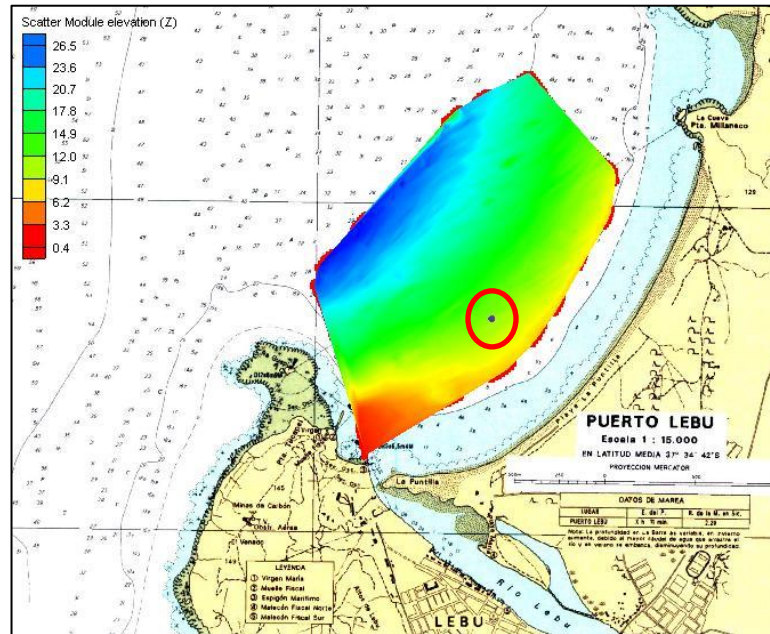
**Tabla 7-3: Configuración espectral del caso 202.5 [°].**

<b>Dirección [°]</b>	<b>Altura [m]</b>	<b>Periodo [s]</b>	<b>Profundidad [m]</b>
202.5	1	6	500
202.5	1	8	500
202.5	1	10	500
202.5	1	12	500
202.5	1	14	500
202.5	1	16	500
202.5	1	18	500
202.5	1	20	500
202.5	1	22	500
202.5	1	24	500

Fuente: Elaboración propia.

Para conocer el espectro energético, el modelo STWAVE tiene diversas alternativas de espectros sintéticos. En este caso se utilizó el modelo TMA, que se utiliza normalmente para pronósticos de oleaje en aguas de profundidad finita. Es una modificación del espectro JONSWAP y se usa preferentemente en la teoría lineal del oleaje (Coastal Engineering Manual, 2002). Posteriormente se genera una estación

de monitoreo a la profundidad de 10 [m] para los 3 modelos, lo que indica que existe sólo un punto de extracción de datos dentro de la propagación desde aguas profundas (Figura 7-3).



**Figura 7-3: Punto de Monitoreo.**

Fuente: Elaboración propia.

#### 7.1.4 PARÁMETROS DE RESUMEN

Los parámetros de resumen se obtuvieron por medio de la colaboración de Don Matías Quezada, Ingeniero Civil Oceánico, quien transfirió los espectros con las funciones de transferencia del punto de monitoreo. Este procedimiento lo realizó mediante el software Ref-Spec que es un programa que fue elaborado por la empresa Baird & Associates y tiene como objetivo recalcular los espectros en aguas someras mediante procesos matemáticos.

Los parámetros de resumen de la base de datos, presentan 30 años de registros que van desde el 01-01-1980 hasta el 01-01-2010 para los 2 casos estudiados. De esta forma, se permitió realizar diferentes análisis para comprender los diversos cambios que el oleaje presentaría debido a los cambios inducidos por el *tsunami*.

Los parámetros de resumen y espectrales que se dispone son:

- Hmo : Altura de Ola Significativa [m]
- Tp : Periodo de Ola Peak [s]
- Tm : Periodo de Ola Medio [s]
- MWD : Dirección Media Espectral [°]

- DPK : Dirección Peak Espectral [°]
- Hswl : Altura de Ola Significativa para oleaje tipo Swell [m]
- DPswl : Dirección Peak para oleaje tipo Swell [°]
- Hsea : Altura de Ola significativa para oleaje tipo Sea [m]
- Tsea : Periodo de Ola para oleaje tipo Sea [s]
- DPsea : Dirección Peak para oleaje tipo Sea [°]

Ya transferidos las componentes espectrales, se procede a generar un clima operacional, el cual permitió esclarecer las incidencias del oleaje como también la ocurrencia de una altura de ola en específico.

## 7.2 MODELO DE EVOLUCIÓN COSTERA

Para la elaboración de los estudios morfodinámicos y los análisis de la evolución de la línea litoral de la bahía de Lebu, se utilizó el Sistema de Modelado Costero (SMC) desarrollado por el grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas de la Universidad de Cantabria para la Dirección General de Sostentabilidad de la Costa y del Mar.

### 7.2.1 SISTEMA DE MODELADO COSTERO SMC (U. DE CANTABRIA)

El Sistema de Modelado Costero es una interfaz gráfica que proporciona herramientas numéricas en el campo de la ingeniería de costas. Desarrolla procesos y modelos numéricos en el corto, mediano y largo plazo de la zona en estudio. Posee diversas tareas en la evolución morfodinámica, como analizar formas en la planta de la costa en una escala temporal y espacial de medio y largo plazo por medio de una generación de imágenes sean planos, cartas náuticas o satelitales.

Para el desarrollo evolutivo de la línea de costa se utiliza la herramienta de mediano y largo plazo que permite crear un polígono a través de imágenes satelitales y de esta forma ejemplificar los cambios en planta de la bahía. Para aquello es necesario disponer de una serie histórica de fotografías aéreas y ajustarlas a una ecuación de equilibrio y verificar una posible tendencia en la planta de la bahía. Este ajuste corresponde a la determinación de los puntos de control y a la orientación del frente de oleaje, condiciones necesarias para la ejecución de los modelos.

Los ajustes de los modelos se realizaron utilizando la metodología empleada por Medina *et al.*, (2001). El empleo de los patrones y condiciones requeridas por los modelos fueron ajustadas dependiendo de la correlación existente, es decir, se realizaron diversos ensayos para distintos escenarios.

En la siguiente sección se definen los modelos a utilizar, sus alcances y formulaciones necesarias para su aplicación.

## 7.2.2 TIPOS DE MODELOS IMPLEMENTADOS

Mediante la herramienta de medio y largo plazo se verificó los cambios en la línea litoral utilizando la metodología de Medina *et al.*, (2001) para la planta de equilibrio. Los modelos de ajuste que desarrollaron en el SMC son espirales parabólicas de Hsu, Tan & Chiew, espirales logarítmicas y rectas.

Martínez (2009) define que las “*playas encajadas y las grandes ensenadas cuya forma se aproxima a una espiral logarítmica o son segmentos de ella, se verán mejor representadas por un modelo parabólico o de espiral logarítmica de acuerdo a la geometría de la bahía*”. Según lo anterior se infiere que la bahía de Lebu se ajustará de mejor manera por medio de estos modelos, debido a encontrarse con límites rocosos en la punta de la ensenada que producirá fenómenos de difracción. Esta dinámica física produce una variación en la incidencia del oleaje sobre la costa produciendo erosión o depositación, cambios morfodinámicos y evoluciones en la línea litoral.

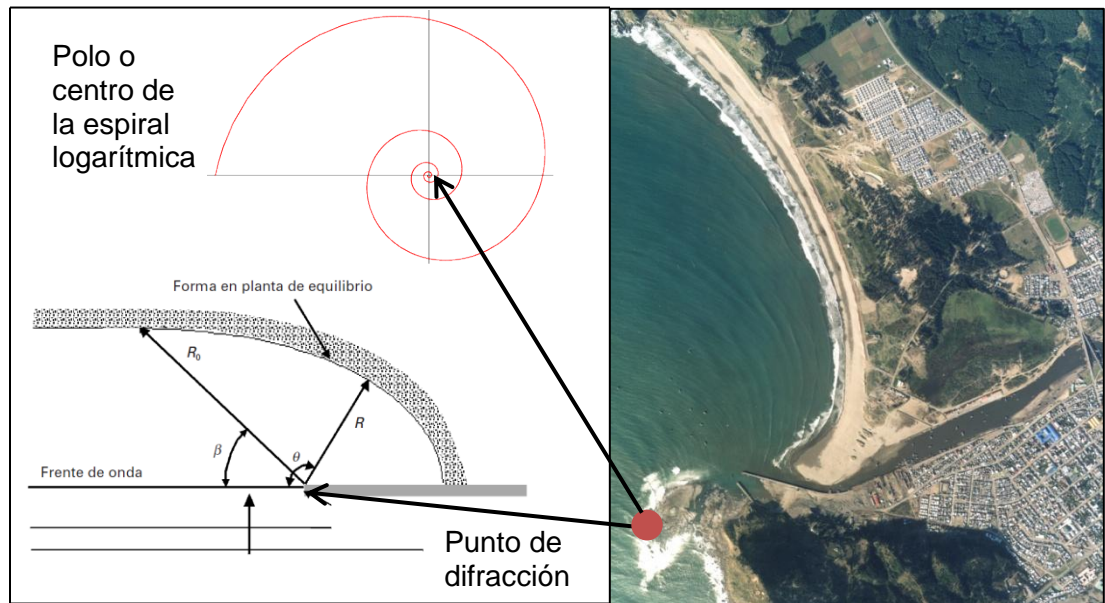
Por su parte Martínez (2009) establece que cuando las bahías adquieren una forma oblicua son denominadas *handland bay* y que son formadas por un promontorio rocoso u obstáculo no erosionable y que es sometido a la acción de un oleaje predominante.

Mediante esta definición se utilizará el modelo de espiral logarítmica que se caracteriza por ser un método empírico que considera condiciones reinantes de oleaje y que han determinado la línea de costa en equilibrio También se empleará el modelo parabólico que se caracteriza por considerar de manera explícita las condiciones de oleaje reinante, mediante la determinación del flujo medio de energía anual (Martínez *et al.*, 2001).

Cabe señalar que Medina *et al.*, (2001) establecen que las espirales logarítmicas se ajustarán bien a la curva de la línea de costa cuando su inicio coincida con los polos de difracción. Sin embargo, en ocasiones los polos de la espiral no está bien definida y el ajuste en las zonas alejadas de la playa es bajo. Es por eso que se complementó con los ajustes parabólicos que aborda un mejor ajuste en las zonas alejadas de las playas.

Posteriormente se realizó una comparación entre ambos modelos y se verificará cual es el mejor ajustado a la bahía de Lebu, cuantificando los avances y retrocesos de la línea litoral en la serie histórica de imágenes satelitales.

En la Figura 7-4 se representa las posibles aproximaciones de los modelos con la bahía de Lebu tomando como referencia la punta de la ensenada como polo de difracción que generará cambios en la oblicuidad del oleaje. Cabe distinguir que la localización de los puntos de control serán variables ajustando de mejor manera los modelos matemáticos y serán definidos en las secciones 8.7.1 y 8.7.2 respectivamente.



**Figura 7-4: Aproximación de Modelos con la Bahía de Lebu (Marzo 2010).**  
Fuente: Elaboración propia.

### 7.2.2.1 FORMULACIONES DE MODELOS

Cada modelo construirá una línea litoral sintética que mejor representa la evolución real de la bahía. De esta manera se definen las condiciones matemáticas que cada modelo propone.

#### 1. **Modelo Logarítmico**

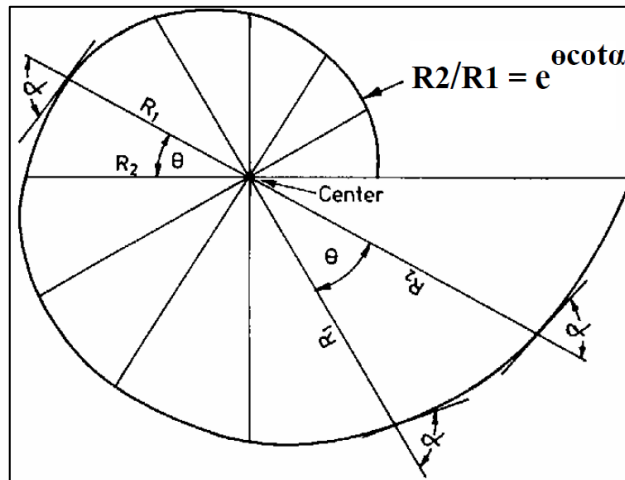
La expresión matemática de la espiral logarítmica se representa en coordenadas polares y está definida como:

**Ecuación 7-1: Expresión Espiral Logarítmica.**

$$\frac{R_2}{R_1} = e^{\theta \cot \alpha}$$

Donde  $R_2$  y  $R_1$  son los radios;  $\theta$  es el ángulo entre  $R_2$  y  $R_1$ ;  $\alpha$  es el ángulo constante entre cada radio y la tangente de la curva que es propio de cada playa, debido a la influencia del oleaje en la zona.

La Figura 7-5 expresa las formulaciones y valores utilizados en la espiral logarítmica.



**Figura 7-5: Representación Matemática Espiral Logarítmica.**

Fuente: Benedet *et al.*, (2004)

La metodología empírica que se utilizará para emplear la espiral logarítmica será por medio del método de los arcos que se caracteriza por construir arcos concéntricos al polo de difracción tomando como inicio el frente de oleaje. Cabe distinguir que la aplicación de este método representará la línea litoral en equilibrio estático.

## 2. Modelo Parabólico

La expresión parabólica que forma la línea de costa en la zona de sombra está representada matemática como:

**Ecuación 7-2: Expresión Espiral Parabólica.**

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

Donde  $R_0$ ,  $\beta$  y  $\theta$  son variables geométricas representadas en la Figura 7-6 y  $C_0$ ,  $C_1$  y  $C_2$  son coeficientes que dependen de  $\beta$ . Tales coeficientes son correlacionados y comparados con el ángulo de incidencia del oleaje  $\beta$  expresado en el eje de las abscisas, según lo estipula la Figura 7-7.

La metodología empleada para este modelo es la que plantearon Medina *et al.*, (2001) que considera la orientación del flujo medio de energía anual en el punto de difracción. Paralelamente utilizando el periodo del flujo medio se determina la longitud de onda  $L$  en el punto de control para determinar la distancia que existe entre el polo de difracción y la tangente de la línea de costa. Obtenido tales distancias es posible calcular el ángulo formado entre el vector  $Y$  (distancia desde el frente de oleaje en el punto de difracción y la tangente de la línea de costa) y  $R_0$ . El ángulo se denomina  $\alpha_{min}$  y se encuentra representado matemáticamente como:

Ecuación 7-3: Expresión de  $\alpha_{min}$ .

$$\alpha_{min} = \arctan \left[ \frac{\left( \frac{\beta_r^4}{16} + \frac{\beta_r^2 Y}{2L} \right)^{1/2}}{\frac{Y}{L}} \right]$$

Donde  $\beta_r$  es un coeficiente de valor 2,13.

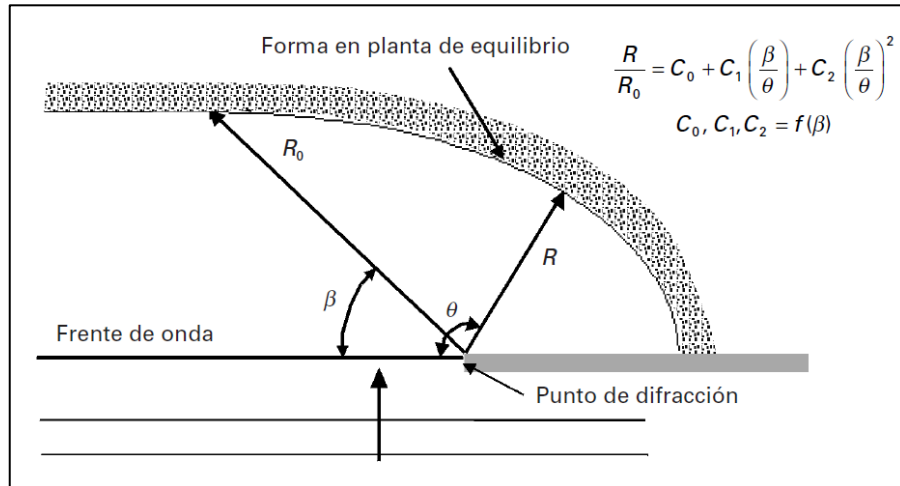


Figura 7-6: Representación Matemática Espiral Parabólica.

Fuente: Medina *et al.*, (2001).

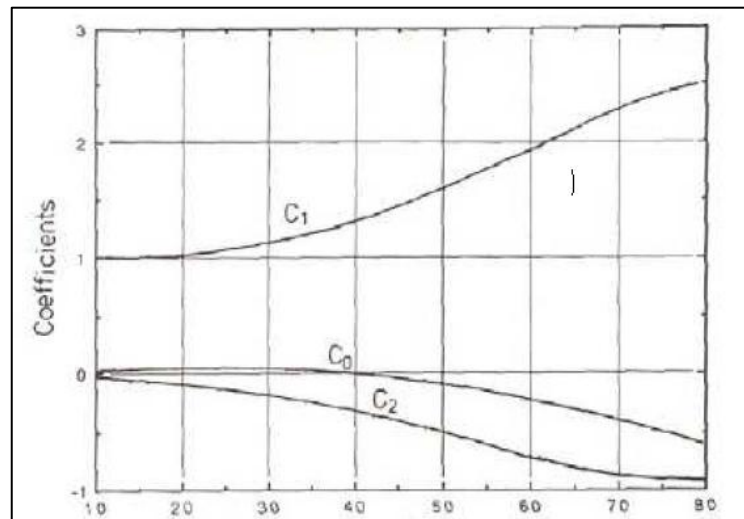


Figura 7-7: Correlación coeficientes y ángulo de incidencia  $\beta$ .

Fuente: (G.I.O.C, 2001).

Según lo dispuesto por G.I.O.C. (2000) la validez del modelo parabólico en planta se cumple siempre y cuando el sistema de corrientes de equilibrio sea asociado al oleaje (no válido para desembocaduras), que contenga solamente un punto de difracción y que las alturas de ola se vean afectadas solo por fenómenos de difracción y refracción.

#### 7.2.2.2 PUNTOS DE CONTROL

Otro factor relevante para la aplicación de los modelos es la localización de los puntos de control que se ubicarán en una zona terrestre y límite de la ensenada para dar inicio a la función logarítmica y parabólica. En el desarrollo y aplicación de los modelos se verificará el ajuste óptimo para cada año en estudio.

Para la ubicación del punto de control en el modelo logarítmico se utilizó como referencia la punta Tucapel al sur de la bahía para representar las ondas difractadas del oleaje. Las coordenadas del punto de control que más se ajustaron a las líneas de costa fueron  $X_d = 617605.878$  [m] e  $Y_d = 5838688.510$  [m].

El punto de control para el modelo parabólico se determinó mediante el flujo medio de energía anual. Sin embargo, para establecer un mejor ajuste con las líneas litorales, el punto de control se ubicó donde la parábola se aproximaba con mayor tendencia. Cabe señalar que la propagación espectral de oleaje se determinó a 10 [m] al interior de la bahía, posición que no es coincidente en el polo de difracción, por ende, se ajustó donde la parábola adquiere mayor aproximación.

## 8. RESULTADOS

### 8.1 MAREAS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las 2 campañas de medición de datos en los mareógrafos del mar y el río tanto para análisis armónicos como para no armónicos.

El tipo de mareas en la bahía de Lebu como en el río es un Régimen Mixto Semidiurno, lo que implica que existen 2 pleamares y 2 bajamares en el día, en ciclos equivalentes de 12 y 6 horas.

#### 8.1.1 ANÁLISIS ARMÓNICO 2011

##### 8.1.1.1 ZONA DE PLAYA

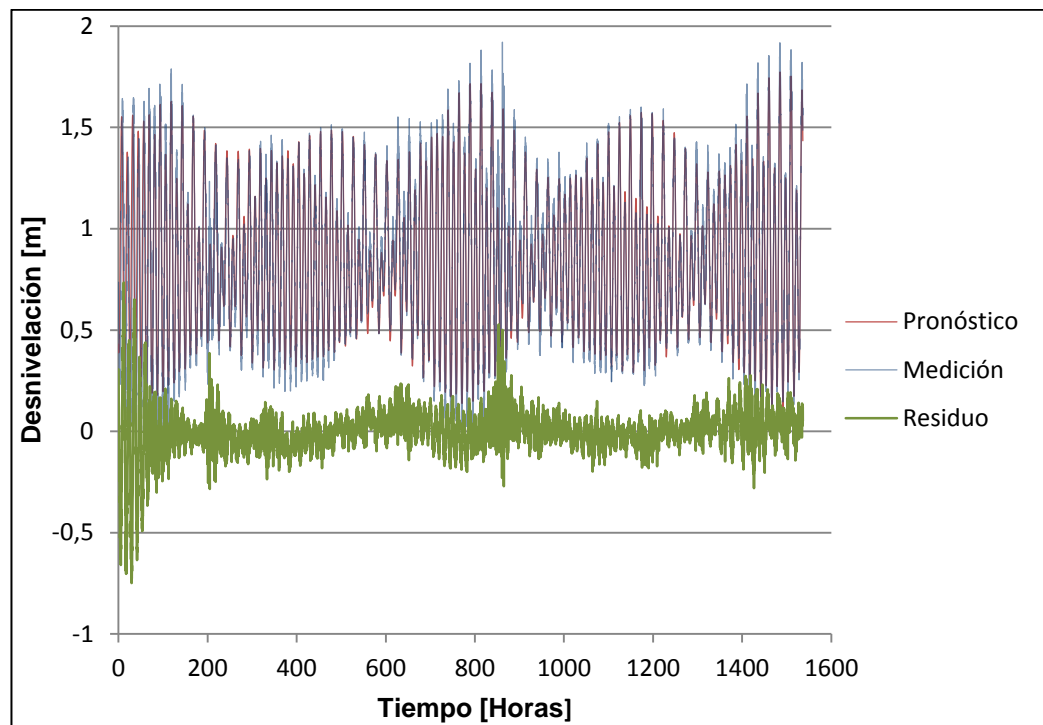
Los parámetros de marea para el sensor ubicado en el mar, se representan en la Tabla 8-1.

**Tabla 8-1: Parámetros de marea en el mar, 2011.**

Tipo Mareal	NMM [m]	NRS [m]	NMMarea [m]
Régimen Mixto Semidiurno	0,854	0,00	0,855

Fuente: Algoritmo t\_tide.

Una vez obtenidos los parámetros de marea se procede a realizar una serie de tiempo que represente las desnivelaciones de las mediciones obtenidas por los sensores de presión, del pronóstico del nivel medio de mar determinado por el algoritmo y el residuo mareal. En la Figura 8-1 se visualiza que los resultados del pronóstico del nivel medio del mar y los medidos por los sensores de presión son similares, dejando en claro que las componentes armónicas predominan en el lugar de extracción de datos y no posee influencias importantes de las corrientes del río u otras componentes no mareales como efectos del viento y diferencias de presión. También se representa los flujos residuales que no afectan directamente los agentes fluviales en el sensor.



**Figura 8-1: Análisis Armónico en el mar, 2011.**

Fuente: Elaboración propia.

Para ilustrar las tendencias de las mareas medidas con las mareas pronosticadas se confeccionó la Figura 11-13, Anexo Mareas. En ella se visualiza que existe un alto ajuste entre sus valores con un 92,06% de correlación, destacando la similitud de los resultados. Se infiere que las constituyentes armónicas presentan una clara predominancia sobre el lugar. Los agentes eólicos y de corrientes presentan una baja ocurrencia en los cálculos.

La densidad espectral de energía en cada uno de los sensores tendrá magnitudes variadas, debido a la ubicación dentro del área de estudio. En caso del sensor en el mar, los valores de energía espectral se representan en la Figura 11-15. Los resultados se obtuvieron utilizando el algoritmo `t_tide.m`, el cual otorga datos de amplitud, fase y frecuencias de las componentes armónicas. Se vislumbra que existe un peak bimodal de energía, debido a las pleamares existentes en el régimen de mareas y su predominancia en el sector. Al contener un sistema mixto semidiurno, las energías espectrales deberán concentrarse en 2 puntos máximos, destacando primordialmente la magnitud de 1,11 [ $\text{m}^2/\text{cph}$ ]. Cabe destacar que los peak de energía se generan para ciclos equivalentes a 12 y 6 horas.

### 8.1.1.2 RÍO LEBU

Los resultados de este apartado se enfocan a las mediciones obtenidas en el río Lebu, según como lo indica la Figura 5-4. Al igual que el sensor de presión localizado en el mar, se analizó los mismos parámetros de mareas para identificar los cambios que se producen al interior del río y verificar si la marea oceánica con sus constituyentes armónicas, afecta una creciente subida del nivel del río. Cabe destacar que estos fenómenos se verán afectados por diversos aspectos, como la pendiente del suelo, forma, anchura, irregularidad en su profundidad y la intensidad de la marea oceánica.

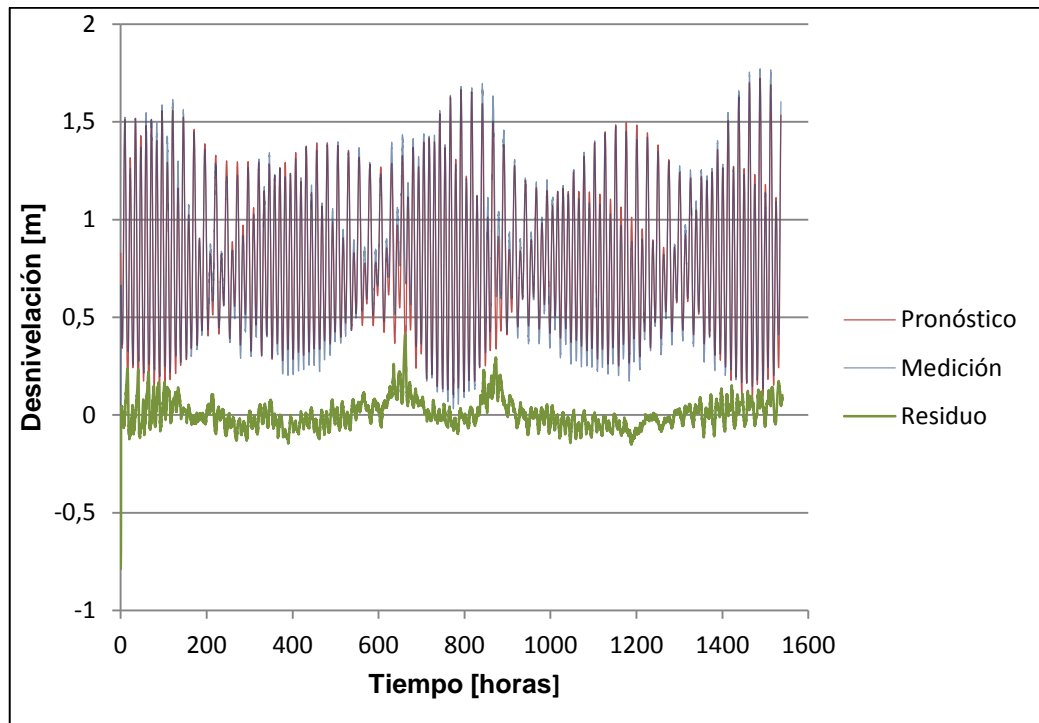
La Tabla 8-2 expone los parámetros de marea en el sensor del río.

**Tabla 8-2: Parámetros de marea en el río, 2011.**

<b>Tipo Mareal</b>	<b>NMM [m]</b>	<b>NRS[m]</b>	<b>NMMarea [m]</b>
Régimen Mixto Semidiurno	0,792	0,031	0,033

**Fuente: Elaboración propia.**

En la Figura 8-2 se aprecia la serie de tiempo sobre las desnivelaciones de mareas medidas y mareas pronosticadas. En ella se puede deducir que los efectos del río y flujos de corrientes sobre el mareógrafo no afectan las corrientes de mareas, las cuales se introducen hasta el punto de medición. Los flujos residuales demuestran que la diferencia entre las mareas es pequeña y la magnitud al comienzo de la medición se debe al procedimiento de instalación del sensor.



**Figura 8-2: Análisis Armónico en el río, 2011.**

Fuente: Elaboración propia.

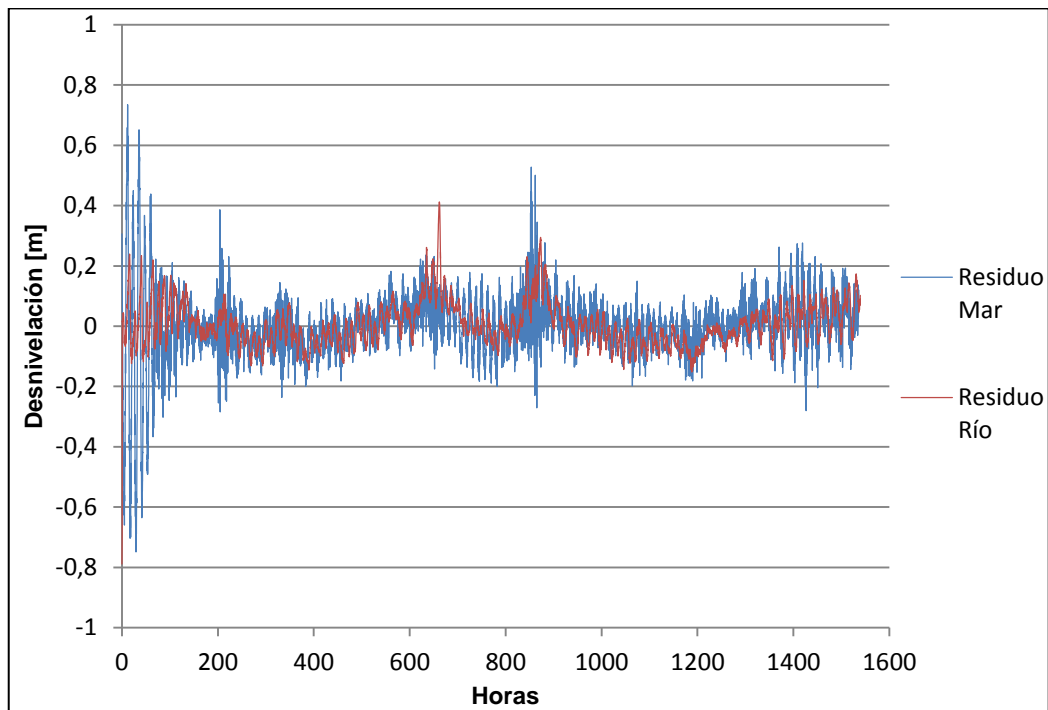
Para definir la correlación existente entre las mareas, se recurrió a confeccionar un gráfico de datos dispersivos y así obtener la línea de tendencia que los valores contienen. En el caso del sensor de presión en el río, las mareas presentan niveles de similitud del 95,86% (Figura 11-14), dejando estipulado que la marea del río es sometida, en tal porcentaje, por fuerzas gravitacionales que ingresan al agente fluvial y que las desnivelaciones del río se deben a componentes armónica o mareas oceánicas y no producto del caudal, para la zona de fondeo del instrumento.

Al igual que la metodología del sensor del mar, se elaboró un espectro de energía, representado en la Figura 11-16 (Anexo Mareas), el cual presenta configuraciones y resultados similares al sensor del mar, con la diferencia que la densidad de energía espectral es menor en el peak. Su fisonomía de régimen mixto semidiurno es idéntica al sensor del mar, pero las energías presentes en el malecón presentan una mayor magnitud, debido al enlace directo entre el sensor y el frente de mareas. En cambio, la marea al ingresar al río tendrá obstáculos de batimetría, caudal del río y fenómenos que disiparán energía.

### 8.1.1.3 COMPARACIÓN ANÁLISIS ARMÓNICO 2011

Para ratificar diferencias entre los 2 sensores de presión, se compararon los pronósticos del nivel medio del mar en una serie de tiempo, los flujos residuales y las densidades espectrales de energía. En la Figura 11-17 (véase Anexo Mareas), se expresan las diferencias en sus magnitudes, distinguiendo que en la zona de mar, las componentes armónicas presentan mayores pleamares que en el río. No obstante, en el río se aprecia que los niveles de marea más baja son predominantes, debido a la pendiente que la cuenca hidrográfica presenta.

Las diferencias en los flujos residuales (Figura 8-3) en la medición se deben a la interacción mar-río y otros fenómenos naturales que modifican los resultados. Estos agentes de energía son el viento, corrientes y el caudal del río que actúa en dirección opuesta al flujo mareal oceánico. Estas interacciones producen cambios en la extracción de datos, que al momento de obtener los pronósticos del nivel medio del mar, poseen diferencias reflejadas en el residuo de marea. Por lo tanto, estas diferencias se deben a procesos naturales que aportan y contribuyen de forma natural las interacciones entre el mar y el río. Por consiguiente, en el mar se presentan mayores aportes de procesos naturales que en el interior del río.



**Figura 8-3: Comparación flujos residuales, 2011.**

Fuente: Elaboración propia.

La energía en ambos sensores presenta una fisonomía idéntica con magnitudes diferentes que se debe al régimen mixto semidiurno. La densidad espectral de energía en el sensor del mar, presentó mayor magnitud que en el río debido a que afecta directamente al frente de mareas.

## 8.1.2 ANÁLISIS NO ARMÓNICO 2011

### 8.1.2.1 MAREÓGRAFO MAR

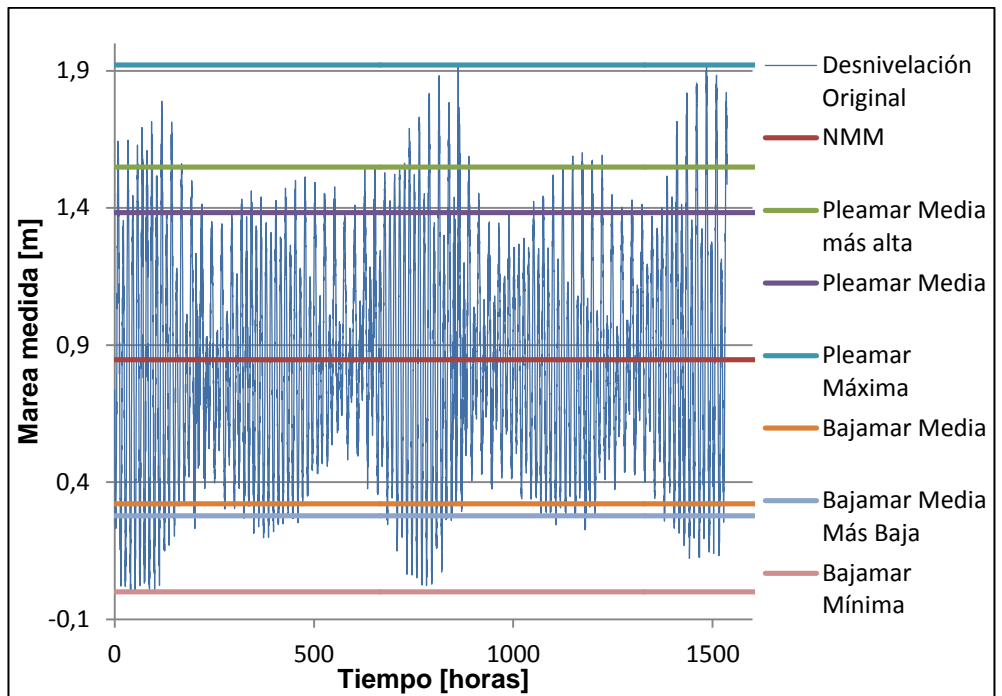
Los parámetros establecidos por el SHOA en su publicación 3202, fueron calculados y representados en la Tabla 8-3.

**Tabla 8-3: Parámetros No Armónicos en el mar, 2011.**

Nivel medio de la marea [m]	0,85
Altura media de la pleamar [m]	1,38
Altura media de la pleamar más alta [m]	1,55
Altura de la pleamar máxima [m]	1,92
Altura media de la bajamar [m]	0,32
Altura media de la bajamar más baja [m]	0,28
Altura de la bajamar mínima [m]	0,00
NRS [m]	0,00
Rango medio de la marea [m]	1,06
Rango medio de la marea en sicigias [m]	0,96
Desigualdad media diurna de la pleamar [m]	0,17
Desigualdad media diurna de la bajamar [m]	0,04

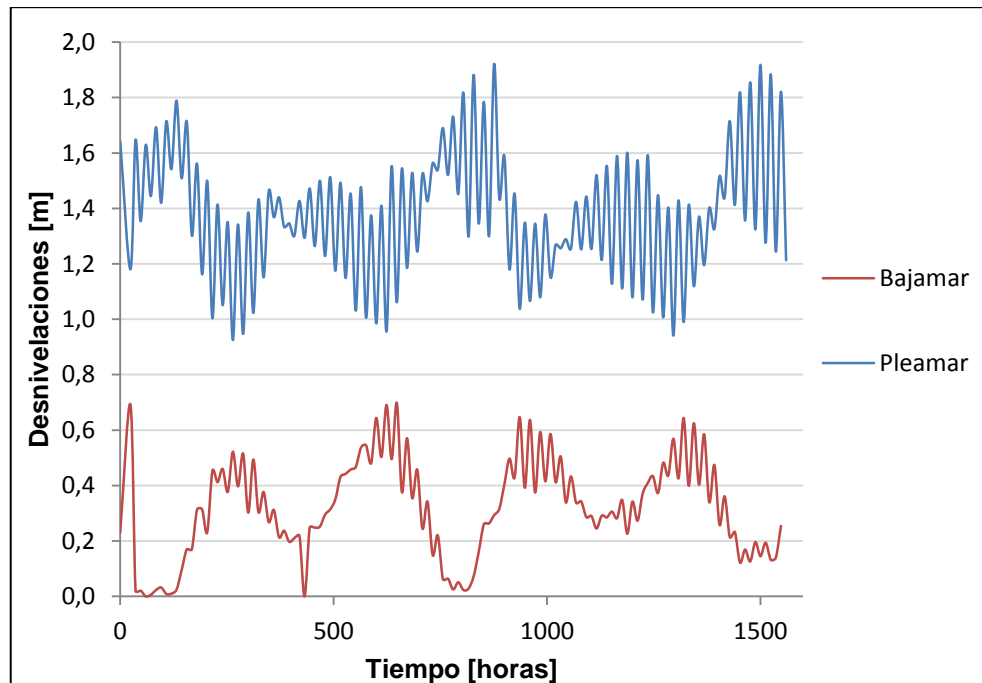
**Fuente: Elaboración propia**

Para una visualización de los parámetros dentro de la serie de tiempo y sus desnivelaciones mareales, se elaboró la Figura 8-4. Para el cálculo de las alturas y rangos de la marea, fue necesario recurrir a las mediciones realizadas por los sensores de presión, de las cuales se obtuvo el nivel medio de la marea que es el promedio de los valores medidos. Luego se procedió a analizar las 2 máximas pleamares y bajamares para cada día, para posteriormente determinar las pleas y bajamares medias. Una representación de los parámetros máximos y mínimos para cada día, según el régimen mareal mixto semidiurno, se encuentra expresado en la Figura 8-5.



**Figura 8-4: Análisis No Armónico en el mar, 2011.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8-5: Pleamar y bajamar en el sensor Mar, 2011.**

Fuente: Elaboración propia.

### 8.1.2.2 MAREÓGRAFO RÍO

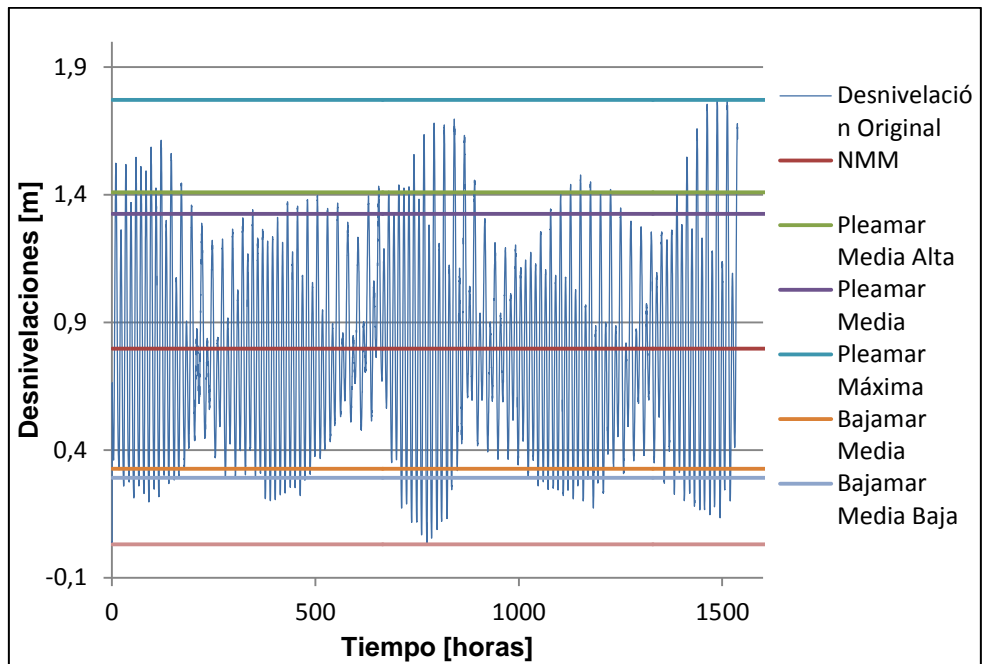
Al igual que el mareógrafo en el mar, se analizaron los parámetros No Armónicos para la marea, pero en este caso en el interior del río. Los resultados se encuentran estipulados en la Tabla 8-4.

**Tabla 8-4: Parámetros No Armónicos en el río, 2011.**

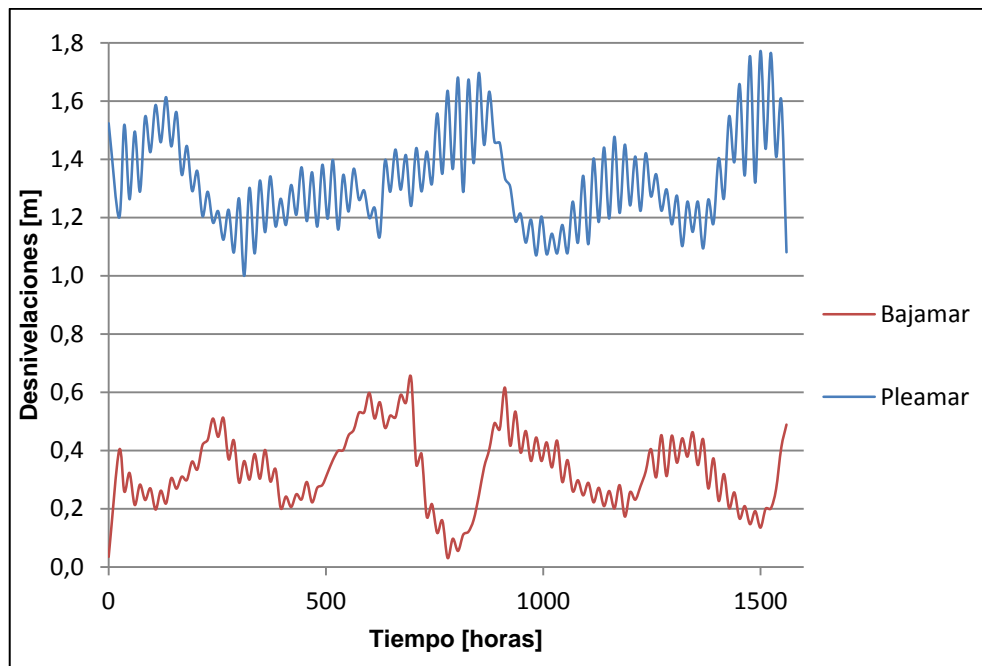
Nivel medio de la marea [m]	0,798
Altura media de la pleamar [m]	1,321
Altura media de la pleamar más alta [m]	1,410
Altura de la pleamar máxima [m]	1,772
Altura media de la bajamar [m]	0,327
Altura media de la bajamar más baja [m]	0,292
Altura de la bajamar mínima [m]	0,031
NRS [m]	0,031
Rango medio de la marea [m]	0,994
Rango medio de la marea en sicigias [m]	0,871
Desigualdad media diurna de la pleamar [m]	0,089
Desigualdad media diurna de la bajamar [m]	0,035

**Fuente: Elaboración propia.**

Para una apreciación de los parámetros No Armónicos, se elaboró la Figura 8-6 y Figura 8-7. En la primera se destaca que la pleamar máxima fue de 1,77 [m] y la bajamar mínima de 0,03[m]. La segunda figura representa los valores máximos y mínimos que se establecieron en la medición, destacando el régimen semidiurno, con 2 eventos máximos y 2 eventos mínimos.



**Figura 8-6: Análisis No Armónico en el río, 2011.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8-7: Pleamar y bajamar en el sensor Río, 2011.**  
 Fuente: Elaboración propia.

### 8.1.2.3 COMPARACIÓN ANÁLISIS NO ARMÓNICO 2011

Los cambios en los parámetros No Armónicos entre el sensor de presión del mar y río, fueron comparados para visualizar las diferencias de magnitudes en las desnivelaciones a medida que la marea astronómica ingresa al río. De tal manera, se confeccionó la Figura 11-19 (Anexo Mareas), que indica las pleas y bajamares en el mar y en el río. Las mayores pleamares se encuentran medidas en el sensor del mar con una media de 1,55 [m] en comparación a 1,41 [m] del sensor en el interior del agente fluvial. La Figura 11-20 representa las diferencias en las magnitudes de la altura y rangos de marea. Se visualiza que existe una predominancia en el mar para todos los parámetros, dejando en manifiesto que el sensor de presión localizado en aguas someras presenta mayores alturas de mareas.

La diferencia en las magnitudes se debe a la disipación de energía que las alturas de marea deben afrontar a medida que se van acercando a aguas someras. Estos fenómenos físicos como difracción, refracción y los efectos de topobatimetría afectan en el frente de mareas. Es así como las mediciones en el interior del río Lebu finalizan con una disminución en sus magnitudes.

### 8.1.3 COMPARACIÓN DE CAMPAÑAS ANÁLISIS ARMÓNICO

Generalmente para corroborar cambios temporales en las mareas es menester realizar comparaciones de diferentes campañas. De esta manera, se procedió a analizar el comportamiento de las mareas en los periodos de verano de los años 2011 y 2012.

Se realizaron comparaciones de las mediciones en los sensores de presión, los cambios en el nivel medio de mar y flujos residuales para cada punto de extracción de datos.

Se analizó de forma independiente cada sensor para determinar y comparar los resultados de ambas campañas.

#### 8.1.3.1 ZONA DE PLAYA

El primer procedimiento para estudiar el comportamiento mareal, fue analizar las componentes armónicas calculadas mediante el algoritmo `t_tide.m` (Pawlowicz, 2011). Con el cálculo de cada constituyente, se obtuvo el tipo mareal para cada campaña, representada en la Tabla 8-5. También se puede apreciar los cambios del nivel medio del mar, marea y el nivel de reducción de sondas. Las mareas para cada campaña contienen un régimen mixto semidiurno, según la clasificación de Courtier (1992). Los cambios en el nivel del mar y NRS podrían deberse a modificaciones en el fondo o lecho marino y por una posible ubicación del cero instrumental.

**Tabla 8-5: Comparación del tipo mareal de cada campaña en el mar.**

	Tipo Mareal	NMM [m]	NRS [m]	NMMarea [m]
<b>Sensor Mar 2012</b>	Régimen Mixto Semidiurno	1,310	0,434	1,310
<b>Sensor Mar 2011</b>	Régimen Mixto Semidiurno	0,854	0,00	0,855

Fuente: Elaboración propia.

Las magnitudes de las densidades espectrales de energía contienen cambios en el tiempo. La Figura 11-21 representa tales diferencias, destacando una mayor densidad espectral en la campaña 2012. Estos resultados se podrían deber a cambios en el nivel medio del mar, en donde la amplitud de marea para cada constituyente armónica es proporcional al cuadrado de la densidad espectral.

Las diferencias en el pronóstico del nivel medio del mar para cada campaña son considerables, tomando en cuenta la misma ubicación de los sensores. Estos cambios se pueden visualizar en la Figura 11-22 (Anexo). En el año 2012 se aprecia que las desnivelaciones poseen una fisonomía uniforme, destacando su régimen semidiurno. Por el contrario, el año 2011 las desnivelaciones de marea presentan desigualdades en sus componentes armónicas, sin embargo, se logra vislumbrar una tendencia de régimen semidiurno.

Los flujos residuales representan las variaciones existentes entre las mediciones de los mareógrafos y los pronósticos del nivel medio del mar. Sus cambios dependen de diversos fenómenos, pero el más significativo es la presencia del río en la bahía, ya que este genera flujos en dirección opuesta al frente de mareas. Tales efectos se pueden apreciar en la Figura 11-23 (Anexo), en la que se puede inferir el efecto más predominante del río en el año 2011, por la alta desnivelación al comienzo de la medición.

#### 8.1.3.2 RÍO LEBU

En las mediciones del río se realizó el mismo procedimiento de comparación que la sección anterior. En la Tabla 8-6 se representa el régimen y el nivel medio de mareas para ambas campañas. El tipo de mareas es un régimen mareal mixto semidiurno.

**Tabla 8-6: Comparación del tipo mareal de cada campaña en el río.**

	Tipo Mareal	NMM [m]	NRS [m]	NMMarea [m]
<b>Sensor Río 2012</b>	Régimen Mixto Semidiurno	0,956	0,069	0,956
<b>Sensor Río 2011</b>	Régimen Mixto Semidiurno	0,792	0,031	0,033

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11-24 se comparan las densidades espectrales de energía, en la que se puede apreciar magnitudes mayores para el año 2012. La tendencia es idéntica al sensor del mar, no existiendo cambios relativos e importantes en su propagación hacia el interior del río.

Los pronósticos del nivel medio del mar para el sensor ubicado en el río, presenta una tendencia similar que en el mar, pero con desnivelaciones más pequeñas debidas a la disipación de energía que la pendiente del río genera. La Figura 11-25 representa la comparación de los pronósticos armónicos.

Los flujos residuales (Figura 11-26) para el año 2011 presentan un breve aumento en sus desnivelaciones, generado principalmente por la diferencia entre las mediciones y los pronósticos del NMM. Estos efectos podrían ser generados por una acumulación de sedimentos en el río a causa del *tsunami* del 27/F de 2010 o por caudales más altos. A medida que transcurre el tiempo el sedimento de la cuenca hidrográfica presenta una tendencia de erosión, por lo que las mediciones de las campañas se vieron afectadas por este efecto físico. Esta temática se profundizará en la sección de Transporte de Sedimentos.

#### 8.1.4 COMPARACIÓN DE CAMPAÑAS ANÁLISIS NO ARMÓNICO

El análisis de comparación se efectuó solamente para el sensor del mar debido a que es en ese lugar en donde se efectuará un posterior estudio de sedimentología y transporte de sedimentos, por lo que un análisis en el río no es necesario.

Para corroborar las comparaciones de los parámetros No Armónicos, se realizó un gráfico de barras para ilustrar las magnitudes de las alturas de mareas, rangos y desigualdades. De la Figura 11-27 se desprende que existen mayores niveles de alturas para el año 2012, sin embargo, hay que considerar que los niveles de reducción de sondas aumentaron en un 43% modificando considerablemente la comparación entre ambas campañas. Esto debido a posibles cambios en el fondo de mar o en el cero instrumental. No obstante, se puede apreciar que los rangos medios de marea permanecen con una diferencia de 9 [cm], dejando estipulado que los cambios en los parámetros se podrían deber a la batimetría del lugar y que ha ido evolucionando en el tiempo, por ende, los resultados de las mediciones de los sensores de presión presentan diferencias significativas.

Para ilustrar los parámetros máximos y mínimos del régimen semidiurno mixto, se elaboró la Figura 11-28. En ella, se puede apreciar las desnivelaciones para ambas campañas y los cambios que se provocaron.

## 8.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

### 8.2.1 ANÁLISIS TRANSVERSAL

Para poder determinar la evolución del tamaño de los sedimentos a causa de acción del *tsunami* es necesario realizar un análisis transversal en la playa. Para ello fue necesario elaborar para cada perfil curvas granulométricas que especifican el porcentaje de peso pasante en relación al diámetro del grano. Además se analizó la evolución del sedimento para las 3 muestras de cada perfil y así definir la tendencia que el grano posee.

Las curvas granulométricas se encuentran representadas en el Anexo Análisis Granulométrico y tienen como referencia el eje de las abscisas los diámetros del grano [mm] y en el eje de las ordenadas el porcentaje de peso pasante. La línea roja, azul y verde simbolizan la Rompiente, Frente Playa y Playa respectivamente según lo estipulado en la Figura 6-1.

#### 8.2.1.1 PERFIL 1

Para el Perfil 1 se obtuvieron 6 fechas de muestras de sedimentos. Se desarrollaron curvas granulométricas para analizar los cambios sedimentológicos que han ocurrido a través del tiempo.

De la Figura 11-1 (Anexo Análisis Granulométrico) se puede inferir que en Diciembre de 2010 existe una mayor concentración de Arena Mediana en la muestra Frente Playa con un 59,77% de frecuencia. En el caso de la Rompiente, esta zona presenta Arena Fina en un 68,61% de ocurrencia.

Para las muestras extraídas en Marzo de 2011, la zona de Frente Playa aumentó la concentración de Arena Fina en un 46,3% y disminuyó la Arena Mediana en un 23,97%. La Rompiente presenta un aumento en la Arena Mediana de un 4,74% y una disminución de un 7,9% de Arena Fina.

En Mayo de 2011 se incorporó una nueva zona de extracción de sedimentos ubicada en la parte trasera de la playa, según lo interpretado en la Figura 6-1. La Rompiente presentó una disminución de un 14,31% en la Arena Fina y un aumento de un 17,3% en la Arena Mediana. Para el sector de Frente Playa existió una leve disminución en la Arena Fina de un 6,75% y un aumento de un 7,45% en la Arena Media. La muestra Playa contiene un 53,39% de Arena Mediana y un 31,2% de Arena Fina, pero se logra vislumbrar la presencia de sedimento grueso con un 14,4% de ocurrencia.

Para el caso de Junio de 2011 las muestras del perfil presentan una evidente disminución de sedimentos finos debido a tormentas que arrastran los granos más pequeños hacia el interior. Es por eso que se logra visualizar la presencia de Arena Gruesa en las 3 muestras. Para el caso de Frente Playa y Playa existe un aumento en la Arena Mediana.

En Febrero de 2012 la playa presenta un aumento de sedimento fino sin presencia de suelo grueso. La Arena Mediana es remplazada por el fino disminuyendo en un 40,35%.

Las muestras para Marzo de 2012 presentan a lo largo del perfil un aumento en la Arena Mediana (22,28%), disminución en la Arena Fina (30,96%) y la presencia de un 11,26% de Arena Gruesa. Para el sector Frente Playa las concentraciones de sedimentos no contienen cambios significativos y en la zona Playa el suelo fino disminuyó en un 41,4% y aumentó en un 47% la presencia de suelo grueso.

Para una representación de la evolución del sedimento para cada muestra del perfil, se elaboró la Figura 8-8 que interpreta de que forma cada rango del sedimento es modificado en el tiempo. De ella se puede concluir que en los periodos entre Mayo y Junio las concentraciones de Arena Mediana para las 3 muestras del perfil experimentan una predominancia siendo el rango con mayor ocurrencia. Además en estos mismos periodos la Arena Gruesa aumenta en un 20% promedio. Sin embargo, el sedimento fino disminuye y su frecuencia es de un 17% promedio.

La Arena Fina posee predominancia en fechas de verano siendo para la zona de Rompiente y Frente Playa un 70% promedio. Para la Playa un 53% de presencia.

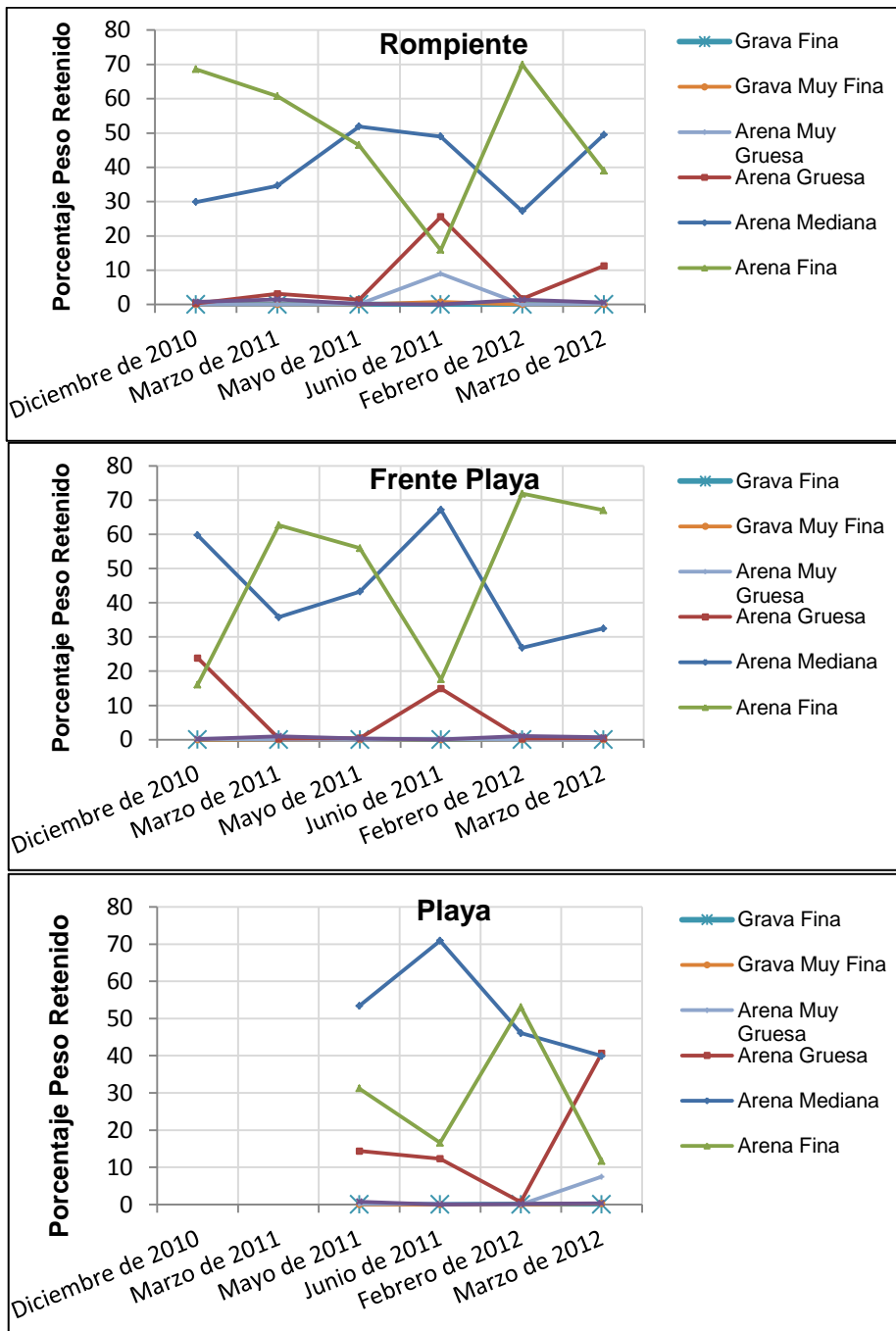
Cabe señalar que para el periodo de Marzo de 2012 existe una gran cantidad de sedimentos gruesos (40,65%) en la zona Playa en comparación a Febrero de 2012 que contenía un 0,67%.

Para una visión global de los resultados anteriores se dispone de la Tabla 8-7 que representan los porcentajes de peso retenido para todas las muestras del perfil 1.

**Tabla 8-7: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 1.**

Perfil	Muestras	Fechas	Grava Fina	Grava Muy Fina	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Fina	Arena Muy Fina
P1	Frente Playa	Diciembre de 2010	0	0	0.2	23.85	59.77	16.04	0.18
		Marzo de 2011	0	0	0.02	0.31	35.8	62.7	1
		Mayo de 2011	0	0	0	0.45	43.25	55.95	0.35
		Junio de 2011	0	0.02	0.26	14.95	67.22	17.61	0.1
		Febrero de 2012	0	0	0	0.3	26.87	71.93	1.04
		Marzo de 2012	0	0	0	0.39	32.47	67.08	0.69
	Rompiente	Diciembre de 2010	0	0.01	0.01	0.3	29.87	68.61	0.75
		Marzo de 2011	0	0	0.04	3.12	34.61	60.71	1.48
		Mayo de 2011	0	0	0.07	1.36	51.91	46.4	0.17
		Junio de 2011	0	0.71	8.95	25.58	48.99	15.87	0.03
		Febrero de 2012	0	0	0.04	1.63	27.19	69.91	1.36
		Marzo de 2012	0	0	0.23	11.26	49.47	38.95	0.56
	Playa	Mayo de 2011	0	0	0.18	14.4	53.39	31.2	0.77
		Junio de 2011	0	0	0.25	12.34	70.9	16.59	0.02
		Febrero de 2012	0	0	0	0.67	46.09	53.09	0.12
		Marzo de 2012	0	0.26	7.47	40.65	39.92	11.69	0.33

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8-8: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 1.**

Fuente: Elaboración propia.

### 8.2.1.2 PERFIL 2

Este perfil contiene 5 fechas de muestreo desde Marzo de 2011 a Marzo de 2012.

La Figura 11-2 (Anexo Análisis Granulométrico) representa las curvas granulométricas para las muestras del perfil 2. En ella se puede visualizar que la zona de Rompiente para Marzo de 2011, existe la presencia de Arena Gruesa (28%), la cual disminuye a menos de 1% de ocurrencia en la zona de Frente Playa. Las concentraciones de Arena Mediana presentan un aumento de 5% desde la Rompiente hasta la zona Frente Playa. El sedimento fino posee mayor predominancia en la zona de Frente Playa con un 58% de frecuencia.

En Mayo la Arena Mediana presentó una disminución desde la Rompiente hasta la Playa de un 11,91%. En cambio, la Arena Fina tiende a aumentar sus concentraciones en un 13,6% desde la Rompiente hasta la Playa.

En el caso de Junio, la Arena Mediana disminuyó 31,25% desde la Rompiente hasta la Playa. No obstante, los sedimentos finos presentan un aumento de un 36,64% desde la Rompiente hasta la zona de Frente Playa y luego una leve disminución de 5,55% hasta la Playa. En relación al perfil 1 Junio presentó contrastes en los resultados, siendo la Arena Gruesa y la Arena Mediana sus mayores concentraciones de sedimento.

En Febrero de 2012 el perfil presentó cambios en relación a la Arena Mediana, ya que para los meses anteriores solamente existió una disminución en sus pesos retenidos. El aumento es de un 18,66% desde la Rompiente hasta la Playa. La Arena Fina tiende a disminuir en el perfil desde la Rompiente hasta la Playa en un 18,34%, siendo la zona de Rompiente el sector que posee un mayor porcentaje de Arena Fina (57,45%).

Finalmente para el caso de Marzo de 2012, los cambios sedimentológicos que presenta el perfil son significativos, puesto que existe la presencia de Arena Gruesa en un 30,5% en la zona Playa y en un 9,43% en la Rompiente. Los porcentajes de pesos retenidos para la Arena Mediana se mantienen relativamente constantes existiendo una variación en el perfil de un 9%. La Arena Fina contiene un 47,2% de ocurrencia en la zona de Frente Playa.

Los cambios temporales del perfil para cada muestra se encuentran representados en la Figura 11-3 (Véase Anexo). De ella se infiere que en el caso de la Rompiente, la Arena Mediana presenta aumentos principalmente en Mayo y en Marzo de 2012, pero disminuye en Febrero. La Arena Fina presenta una progresión desde Marzo de 2011 hasta Febrero que es su peak con un 57,45% de ocurrencias. La Arena Gruesa muestra una disminución desde Marzo de 2011 hasta Mayo, para luego ir aumentando lentamente hasta Marzo de 2012 con un 10% de frecuencia.

En la Tabla 8-8 se representa el porcentaje de peso retenido para el perfil 2 y de ella se infiere que en la zona Frente Playa existen evoluciones de sedimentos solamente para los rangos de Arena Mediana y Arena Fina, el resto de los tamices no serán considerados por el bajo porcentaje en sus pesos retenidos. La Arena Mediana

desde Marzo de 2011 exhibe un leve aumento hasta Mayo para luego disminuir considerablemente en Junio y aumentar en Febrero y Marzo de 2012. Sin embargo, la disminución de la Arena Mediana en Junio conlleva a un aumento en la Arena Fina.

En el caso de Playa, no se posee el mes de Marzo de 2011, por lo que el análisis temporal solo se efectuó para el resto de las muestras. Al igual que la zona de Frente Playa en Junio existe un aumento en la Arena Fina y una disminución en la Arena Mediana. Lo destacable en este sector es que existe un aumento exponencial en la Arena Gruesa desde Mayo a Marzo llegando a un 30,5% de peso retenido.

**Tabla 8-8: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 2.**

Perfil	Muestras	Fechas	Grava Fina	Grava Muy Fina	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Fina	Arena Muy Fina
P2	Frente Playa	Marzo de 2011	0	0	0	0.21	39.86	58.75	0.71
		Mayo de 2011	0	0	0.01	0.12	45.78	53.61	0.46
		Junio de 2011	0	0	0.01	0.59	18.35	79.5	1.6
		Febrero de 2012	0	0	0	0.54	52.21	46.8	0.41
		Marzo de 2012	0	0	0.12	1.96	51.5	47.2	0.16
	Rompiente	Marzo de 2011	0	0.01	5.21	27.8	35.35	30.9	0.52
		Mayo de 2011	0	0	0.27	2.41	60.16	36.9	0.21
		Junio de 2011	0	0.17	0.32	3.25	53.12	42.86	0.35
		Febrero de 2012	0	0.15	1.86	4.72	34.98	57.45	0.81
		Marzo de 2012	0	0	0.09	9.43	56.04	34.88	0.12
	Playa	Mayo de 2011	0	0	0.02	0.35	48.25	50.5	0.88
		Junio de 2011	0.07	0	0	0.16	21.87	73.95	4.02
		Febrero de 2012	0	0	0.05	5.98	53.64	39.11	1.26
		Marzo de 2012	0	0.09	2	30.5	47.95	18.56	1.19

Fuente: Elaboración propia.

### 8.2.1.3 PERFIL 3

Este es el perfil que se encuentra más cercano al río Lebu, principalmente la muestra de Rompiente. En la Figura 11-4 (Anexo Análisis Granulométrico) se encuentran representadas las curvas granulométricas y los resultados de las muestras de sedimentos.

Para Marzo de 2011 solo se cuenta con datos de Frente Playa y Rompiente. La Arena Mediana en la Rompiente posee un 40,4% de peso retenido, disminuyendo en un 5,02% en la zona de Frente Playa. Los niveles de Arena Fina aumentan considerablemente desde la Rompiente hasta el Frente Playa con un 59,43% de excedencia. Cabe destacar la presencia de sedimentos gruesos que en la zona de Rompiente que presentan un 49,92% de frecuencia.

En Mayo de 2011 el perfil presenta una disminución en la Arena Mediana de 9,66% desde la Rompiente hasta la Playa. La Arena Fina también presenta una depreciación en sus porcentajes que es de 21,4 desde la Rompiente hasta la zona trasera de la playa. En la zona Playa existe un 11,2% de Arena Muy Gruesa.

Para Junio el sedimento medio posee mayores concentraciones en la Rompiente (53,12%) y en la Playa (49,59%). La Arena Fina presenta un 3,03% en la Rompiente, un 17,75% en Frente Playa y un 23,1% en Playa, expresando un

incremento en los granos pequeños. La Arena Gruesa tiene mayores concentraciones en la Rompiente (41,63%) y van disminuyendo el porcentaje de peso retenido a medida que se va acercando a la zona de Playa. En la Rompiente se aprecia un 27% de Arena Muy Gruesa y un 6,38% de Grava Muy Fina, por lo que es en este sector donde se encuentra las mayores acumulaciones de sedimento grueso a lo largo del perfil.

En Febrero los sedimentos finos se conglomeran principalmente en la zona de Frente Playa y las arenas medianas contienen una diferencia en el perfil de un 5% aproximadamente. La presencia de Arena Gruesa se encuentra en la Rompiente (16,9%) y en la Playa (22%).

Las concentraciones en Marzo de 2012 presentan una acumulación de sedimento medio en la zona Playa con un 76,72%. El sedimento fino se aglomera en mayor cantidad en el Frente Playa con un 44,15%. La presencia de Arena Gruesa se encuentra a lo largo del perfil teniendo mayor porcentaje de ocurrencia en la Rompiente.

Según la Tabla 8-9 los cambios temporales de los sedimentos en la Rompiente tienen mayores conglomeraciones de granos gruesos en invierno y sedimentos finos en verano. Las arenas medianas disminuyen en Junio. La zona de Frente Playa en cambio, posee una homogeneidad similar a la Rompiente con sedimentos finos en invierno y altos índices de arenas gruesas. En verano los sedimentos finos predominan desapareciendo gruesos. El sector trasero de la playa, mantiene constante sus valores de arena gruesa, pero en Marzo de 2012 disminuye levemente al igual que el sedimento fino. Las arenas medianas predominan en este sector con un 58% promedio en sus meses de medición.

Para visualizar la evolución del grano en cada una de las muestras del perfil se elaboró la Figura 11-5 (Anexo Análisis Granulométrico).

**Tabla 8-9: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 3.**

Perfil	Muestras	Fechas	Grava Fina	Grava Muy Fina	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Fina	Arena Muy Fina
P3	Frente Playa	Marzo de 2011	0	0	0	0.26	35.38	63.94	0.33
		Mayo de 2011	0	0.02	0.3	6.36	65.28	27.65	0.4
		Junio de 2011	0	0	0.14	27.97	53.12	17.75	0.13
		Febrero de 2012	0	0	0	1.31	46.13	52.16	0.41
		Marzo de 2012	0	0.02	0.21	3.58	52.09	44.15	0.33
	Rompiente	Marzo de 2011	0	5.04	19.39	30.53	40.4	4.51	0.13
		Mayo de 2011	0	0.17	1.75	6.8	57.6	32.84	0.77
		Junio de 2011	2.35	6.38	27	41.63	19.7	3.03	0.04
		Febrero de 2012	0	0	1.03	16.9	45.33	36.67	0.23
		Marzo de 2012	0	0.12	1.23	14.01	53.59	30.81	0.7
	Playa	Mayo de 2011	0	0.85	11.2	21.08	55.62	11.17	0.03
		Junio de 2011	0	0.11	4.4	22.02	49.59	23.1	0.81
		Febrero de 2012	0	0.08	3.07	22	50.25	23.76	0.68
		Marzo de 2012	0	0	0.12	8.69	76.72	15.23	0.11

Fuente: Elaboración propia.

#### 8.2.1.4 PERFIL 4

Luego de las primeras mediciones se incorporó este perfil entre los perfiles 2 y 3 para dar mayor representatividad a la evolución granulométrica de la playa de Lebu.

En la Figura 11-7 (Anexo Análisis Granulométrico) se representan las curvas granulométricas para el perfil 4. Dentro del perfil la Arena Mediana presenta un aumento desde las muestras del mar a la playa en un 56,25% para Marzo de 2011. La Rompiente presenta un 69,2% de Grava Muy Fina. Para Mayo solo se cuenta con datos en la Rompiente y en la Playa. La distribución de granos dentro de este perfil para esta fecha no demuestran cambios significativos, siendo la Arena Mediana la con mayor porcentaje de peso. Para las muestras extraídas en invierno las arenas medianas poseen una tendencia a aumentar sus concentraciones a lo largo del perfil. La Arena Fina tiene mayores niveles en el Frente Playa con un 47,13%. En Febrero de 2012 los sedimentos finos disminuyen de un 51% en la Rompiente hasta un 14% en la Playa. En la zona trasera se caracteriza por contener un 48% de sedimentos gruesos. En Marzo de 2012 la zona trasera presenta mayores concentraciones de sedimentos finos y en la Rompiente arena mediana con un 63%.

Según la Tabla 8-10 las evoluciones de sedimento dentro del perfil representan mayores diferencias en la Rompiente especialmente en la Grava Muy Fina que en Marzo de 2011 presenta un 69,2% de frecuencias y en Marzo de 2012 no contiene concentraciones de tal sedimento. La Arena Mediana oscila mostrando sus peak de porcentaje en Mayo y Marzo de 2012. En febrero de 2012 el sedimento fino predomina y en Junio la Grava Fina y Muy Fina. Para la zona de Frente Playa las arenas medianas presentan una disminución en el tiempo en contraste con el aumento exponencial del sedimento fino. La Arena Gruesa también presenta disminuciones temporales. Finalmente el sector denominado Playa, presenta una tendencia a aumentar el sedimento fino en invierno y disminuirlo en verano. En cambio, la Arena Gruesa muestra lo opuesto, siendo en invierno sus niveles más bajos y en verano más altos.

La representación de las evoluciones del sedimento de las muestras se encuentra estipulado en la Figura 11-6 (Anexo Análisis Granulométrico).

**Tabla 8-10: Porcentajes de Peso Retenido, Perfil 4.**

Perfil	Muestras	Fechas	Grava Fina	Grava Muy Fina	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Fina	Arena Muy Fina
P4	Frente Playa	Marzo de 2011	0	0.21	3.11	16.51	60.7	19.25	0.16
		Junio de 2011	0	0.47	3.8	12.69	61.3	21.47	0.35
		Febrero de 2012	0	0.03	0.74	3.35	47.72	47.13	1.06
		Marzo de 2012	0	0.04	0.03	1.53	28.77	68.42	1.99
	Rompiente	Marzo de 2011	0	69.2	17.66	8.05	4.45	0.58	0.03
		Mayo de 2011	0	3.54	10.38	17.42	54.72	13.79	0.05
		Junio de 2011	21.14	23.06	16.48	10.85	10.38	18.08	0.17
		Febrero de 2012	0	0.36	0.89	2.65	43.28	51.77	0.93
		Marzo de 2012	0	0	0	6.87	63.99	28.99	0.76
	Playa	Mayo de 2011	0.54	7.98	12.39	18.43	47.81	12.56	0.18
		Junio de 2011	0	1.64	3.4	8.99	48.7	36.49	1.06
		Febrero de 2012	0	0.05	12.83	36.21	35.25	14.62	1
		Marzo de 2012	1.15	2.61	1.43	1.46	38.8	54.32	0.68

Fuente: Elaboración propia.

## 8.2.2 TIPO DE SEDIMENTO EN LA PLAYA

Una manera de clasificar el sedimento de forma representativa es utilizando el d50, que es el diámetro del sedimento que es excedido en un 50% de la muestra. Para verificar una posible evolución sedimentaria, se realizó un análisis temporal del parámetro, siendo calculado para todas las muestras en estudio.

Los cambios de sedimentos en el tiempo para el perfil 1 se encuentra representado en la Tabla 8-11. De ella se infiere que el grano experimenta cambios generales dentro del rango de Arena Mediana y Arena Gruesa y que los periodos de invierno el sedimento grueso es el predominante a lo largo del perfil.

**Tabla 8-11: Clasificación de Sedimentos, Perfil 1.**

	<b>Marzo 11</b>	<b>Mayo 11</b>	<b>Junio 11</b>	<b>Febrero 12</b>	<b>Marzo 12</b>
<b>Playa</b>	-	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Gruesa
<b>Frente Playa</b>	Arena Mediana	Arena Mediana	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Fina
<b>Rompiente</b>	Arena Mediana	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Gruesa

Fuente: Elaboración propia.

Según lo dispuesto en la Tabla 8-12, los sedimentos en el perfil 2 permanecen en el rango de Arena Mediana y Gruesa, siendo Marzo del año 2012 el que presenta sedimentos gruesos en todo el perfil, condición de una posible erosión de sedimentos finos.

**Tabla 8-12: Clasificación de Sedimentos, Perfil 2.**

	<b>Marzo 11</b>	<b>Mayo 11</b>	<b>Junio 11</b>	<b>Febrero 12</b>	<b>Marzo 12</b>
<b>Playa</b>	-	Arena Mediana	Arena Mediana	Arena Gruesa	Arena Gruesa
<b>Frente Playa</b>	Arena Mediana	Arena Mediana	Arena Mediana	Arena Gruesa	Arena Gruesa
<b>Rompiente</b>	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Gruesa

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 8-13 expresa la clasificación y evolución de sedimentos para el perfil 4, de ella se infiere que los granos en general son gruesos para todas las muestras presentando cambios de tamaño mínimos en el tiempo.

Para el perfil que se encuentra localizado cerca del río Lebu (Tabla 8-14), los sedimentos no presentan grandes cambios en relación al perfil 4, siendo predominante el grano grueso. Se deduce además que el aporte de sedimentos del agente fluvial influye en la granulometría de la zona, considerando una posible depositación de arenas provenientes del río. Cabe señalar que según el estudio de mareas se infirió que existe un cambio en el nivel medio del mar en el río, por ende, una posible disminución del fondo (considerando la profundidad positiva), lo que deja

estipulado que existió un arrastre de sedimentos a causa del *tsunami* y los aportes que este ejerza sobre la playa no serán exclusivos de las estadísticas anuales, sino de una mezcla entre los sedimentos acrecentados y los arrastrados a lo largo del río.

De lo anterior se infiere que los tamaños del grano para todas las fechas y para todas las zonas de muestreo, presentan en general una clasificación de arenas gruesas debido a una posible erosión en la playa y que los sedimentos finos se transporten al fondo de la bahía (Sección 8.4.2) y permanezcan los gruesos.

**Tabla 8-13: Clasificación de Sedimentos, Perfil 4.**

	<b>Marzo 11</b>	<b>Mayo 11</b>	<b>Junio 11</b>	<b>Febrero 12</b>	<b>Marzo 12</b>
<b>Playa</b>	-	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana
<b>Frente Playa</b>	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana
<b>Rompiente</b>	Grava Fina	Arena Gruesa	Grava Muy Fina	Arena Mediana	Arena Gruesa

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 8-14: Clasificación de Sedimentos, Perfil 3.**

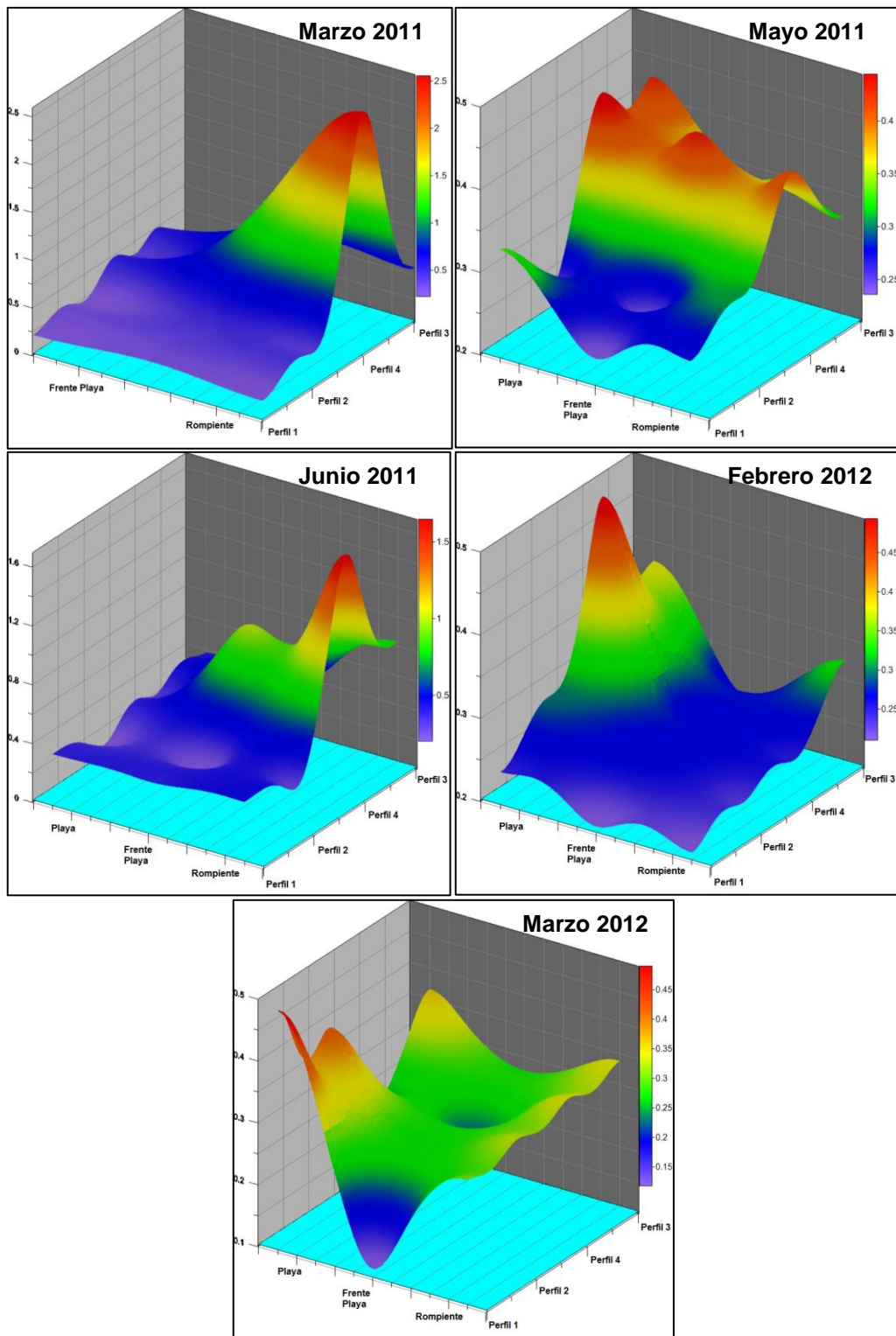
	<b>Marzo 11</b>	<b>Mayo 11</b>	<b>Junio 11</b>	<b>Febrero 12</b>	<b>Marzo 12</b>
<b>Playa</b>	-	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Gruesa
<b>Frente Playa</b>	Arena Mediana	Arena Gruesa	Arena Gruesa	Arena Mediana	Arena Gruesa
<b>Rompiente</b>	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Muy Gruesa	Arena Gruesa	Arena Gruesa

Fuente: Elaboración propia.

Para visualizar la clasificación del d50 de mejor manera se dispone de la Figura 8-9 que representa en forma tridimensional, las tablas anteriormente analizadas.

De la Figura 8-9 se visualiza que los tamaños del diámetro d50 en Marzo de 2011, presentan magnitudes mayores en relación a las otras fechas estudiadas. Marzo de 2011 y Junio del mismo año, presentan una similar tendencia, siendo el perfil 4 el predominante en la zona de Rompiente.

Mayo y Febrero también expresan una dinámica parecida, presentando sedimentos gruesos cerca del río y en las zonas traseras de la playa.



**Figura 8-9: Diagrama d50 para la playa de Lebu.**  
Fuente: Elaboración propia.

## 8.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS SEDIMENTOS

Los resultados del análisis estadístico se enfocaron en la distribución de los 4 perfiles a lo largo de la playa con sus respectivas muestras. En ellos se caracterizan los indicadores estadísticos y el comportamiento que el sedimento adquirió

### 8.3.1 PERFIL 1

Según lo dispuesto en la Tabla 11-1 (Anexo Análisis Estadístico), se puede interpretar lo siguiente de los indicadores estadísticos:

*Curtosis:* En Mayo el sector trasero de la playa presenta una distribución leptocúrtica lo que indica que las muestras se encuentran mejor clasificadas en la parte central que en los extremos. En Junio la distribución se centraliza aun más. En cambio, para las muestras de Marzo de 2012, los datos adquirieron una forma mesocúrtica, lo que indica que su distribución no es excesiva ni deficientemente aguda. En la zona Frente Playa, las distribuciones para Marzo de 2011 y Mayo son platicúrticas lo que indica una baja concentración de datos en torno a los valores centrales. En Junio existe una aglomeración excesiva de valores en la zona centralizada de la curva. Los otros periodos de muestra no clasifican dentro del rango, por lo que no se pudieron definir. En la zona de Rompiente los periodos de Marzo de 2011 y 2012 y Mayo representan una distribución con escasa concentración de datos en la parte central. Sin embargo, para Junio los valores presentan una curva excesivamente aguda.

*Asimetría:* En el sector de la Playa para Mayo y Junio se presenta un moderado exceso de sedimentos finos. En cambio a medida que transcurre el tiempo, la cantidad de sedimento grueso posee un alto exceso en las colas de la distribución. En Marzo de 2012 las muestras disminuyen a moderado el exceso de sedimentos gruesos. En el caso de la zona de Frente Playa se presenta un alto exceso de finos para Marzo de 2011 y Mayo, disminuyendo su concentración en las colas el mes de Junio. En Febrero y Marzo de 2012 la distribución aumenta su exceso de sedimentos gruesos. En la zona de Rompiente la asimetría presenta cambios sustantivos en su distribución, tal es el caso que para los meses de Marzo y Junio de 2011, existe un alto exceso de finos. Mayo y Marzo de 2012 presentan una moderación en su concentración de sedimentos. Febrero de 2012 es el periodo donde la concentración de sedimentos en la cola de la distribución es de sedimentos gruesos.

*Desviación Estándar:* Este parámetro estadístico clasifica de forma relativa las muestras de sedimentos, en donde la zona de la Playa para los periodos de Mayo y Junio se encuentra muy bien clasificada. En cambio, Febrero y Marzo se encuentran moderadamente clasificados. Para la zona de Frente Playa la clasificación de todos los periodos en estudios se encuentran bien clasificados. El sector de la Rompiente presenta una clasificación buena, en excepción de Marzo de 2012 que presenta una clasificación moderada.

### 8.3.2 PERFIL 2

Tomando en consideración el idéntico procedimiento del caso anterior, se analizaron los indicadores estadísticos para el perfil 2 (Tabla 11-2).

*Curtosis:* En el sector de la Playa para los diferentes periodos existe un comportamiento diverso en la distribución de sus componentes, de tal forma que para el mes de Junio la concentración de los datos se encuentran en la parte central de la curva siendo muy leptocúrtica. A medida que transcurren los meses la concentración de valores va perdiendo centralidad llegando a Marzo de 2012 con una curva mesocúrtica. En el sector de Frente Playa la fisonomía de la distribución tiende a concentrarse en leptocúrtica siendo la más predominante. En el caso de la Rompiente los datos adquirieron una clasificación leptocúrtica, tomando en consideración que existen periodos en los cuales los resultados estadísticos no clasificaban dentro del rango estipulado.

*Asimetría:* En el sector trasero de la playa, la curva de asimetría presenta una conglomeración de valores en el extremo positivo, por lo que la tendencia con tales características es de sedimento fino. Para Marzo de 2012 la curva es simétrica, presentando igualdad en los resultados. El sector Frente Playa para todos los periodos de estudio, presenta una conglomeración en la cola positiva de la distribución, clasificando un alto exceso de sedimento fino. Para el caso del sector de la Rompiente, los valores fluctúan dentro de todo el rango de clasificación, presentando una discontinuidad en sus resultados siendo parcialmente no representativo.

*Desviación Estándar:* La clasificación para todo el perfil es muy buena, en excepción de los periodos de Marzo y Febrero de 2012 que contienen una moderada clasificación.

### 8.3.3 PERFIL 4

En la Tabla 11-4 se representa los parámetros estadísticos para el perfil 4.

*Curtosis:* En el sector de la playa para Mayo y Junio de 2011 la curva de distribución presenta una aglomeración en el centro, adquiriendo una fisonomía puntiaguda. Febrero y Marzo la curva cambia su tendencia y presenta una hegemonía en sus valores arrastrando valores hacia las colas perdiendo centralidad. La zona de Frente Playa contiene valores centralizados para las diferentes fechas de cálculo. En la Rompiente la distribución varía considerablemente desde valores predominantes en las colas hasta datos aglomerados en el centro.

*Asimetría:* En el sector de la Playa el sedimento clasifica dentro del rango de exceso de finos para todas las fechas en estudio, en excepción de Febrero de 2012 que presenta un moderado exceso de finos. La zona de Frente Playa de igual forma clasifica con sedimento fino adquiriendo un alto exceso. En la Rompiente existe una

variación en la clasificación asimétrica, cambiando en cuantiosamente desde sedimento fino a grueso.

*Desviación Estándar.* En la Playa la clasificación es moderada, sin embargo a medida que se va acercando a la rompiente el rango comienza a cambiar, presentando variaciones en la distribución.

#### 8.3.4 PERFIL 3

En la Tabla 11-3 se representan las estadísticas del perfil 3.

*Curtosis:* En el sector de la Playa los valores presentan una tendencia a centralizarse en la curva de distribución, por el contrario en la zona de Frente Playa los datos se dispersan presentando una clasificación mesocúrtica. En la Rompiente los valores presentan variación desde una aglomeración centralizada hasta una dispersión platicúrtica.

*Asimetría:* En la Playa los meses de Mayo y Junio la distribución clasifica con un alto exceso de finos par luego en Febrero y Marzo adquirir una curva simétrica. La zona Frente Playa al igual que la Rompiente, presentan una evolución en la clasificación de sedimentos, variando desde un alto exceso de finos hasta un alto exceso de gruesos.

*Desviación Estándar.* A lo largo del perfil el sedimento se encuentra muy bien clasificado, presentando épocas con clasificación moderada.

## 8.4 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A continuación se presentan los resultados de los cambios batimétricos, el transporte de sedimento y los cambios de perfil en la bahía de Lebu para los 2 casos en estudio.

### 8.4.1 CAMBIOS BATIMÉTRICOS

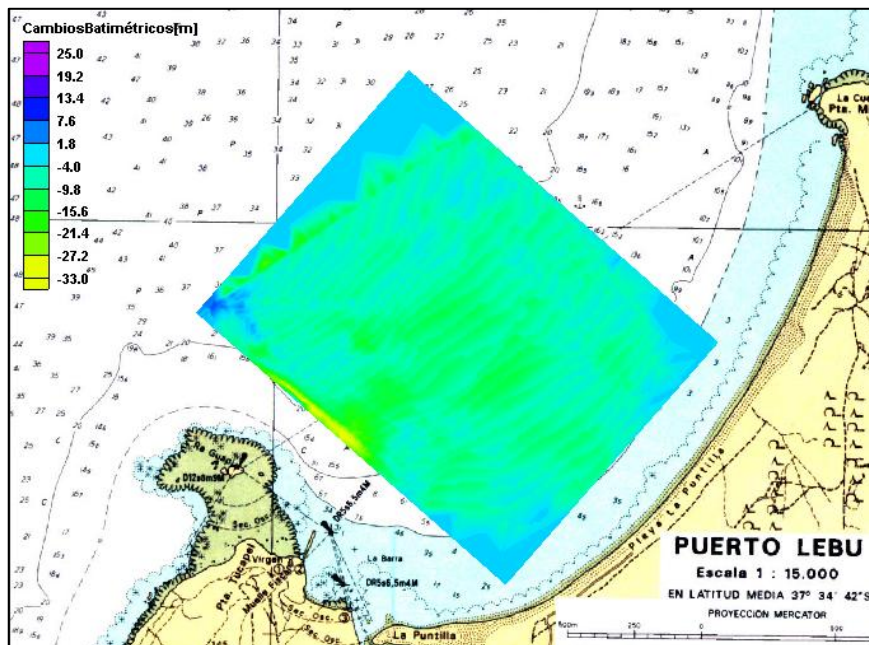
Al comparar la batimetría en detalle de Junio de 2011 con la batimetría de la carta náutica de 1993 se determinó que la profundidad de la bahía ha disminuido presentando niveles de acreción en gran parte de la bahía. Lo dispuesto en la Figura 8-10 especifica el transporte de sedimento de la ensenada observando formas en el fondo de inmigración, siendo los valores positivos un estado de erosión y los negativos un estado de acumulación sedimentaria, debido a que la batimetría de 1993 es más profunda que la de Junio de 2011. Los cambios de acumulación presentados en la bahía se podrían deber al evento sísmico y posterior *tsunami* del 27/F de 2010, debido al arrastre de sedimentos en el arribo de las olas en la costa y las corrientes generadas por el oleaje.

Por el contrario, los resultados obtenidos para el caso después del evento sísmico (año 2012) son inversos, presentando un aumento en la profundidad y de esta forma clasificar dentro de un estado de erosión (Figura 8-11). A diferencia del caso anterior, la zona cercana al río presenta una erosión aproximada de 25 [m], un estado que tiende al equilibrio. La media en la bahía es de 2 [m] de erosión. Los resultados obtenidos después del *tsunami*, clarifican un estado de equilibrio en la bahía, ya que en el periodo de mediano plazo se comienza a visualizar cambios inmediatos en la profundidad, tomando en consideración que estos movimientos en masa se producen normalmente en largo plazo.

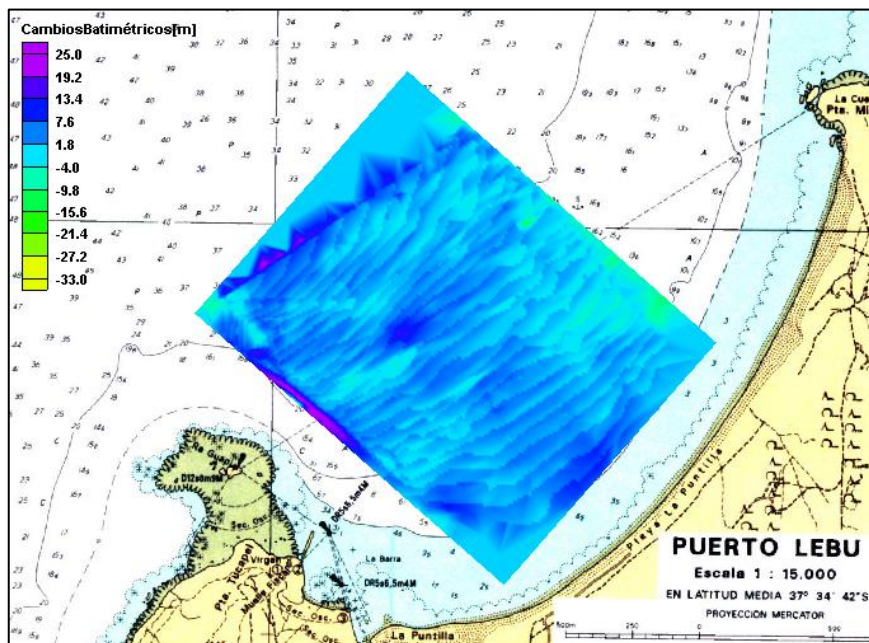
Los cambios morfodinámicos producidos por el *tsunami* produjeron un avance costero en la bahía de Lebu que se ha ido modificando en el mediano plazo, presentando un estado erosionable de menos transporte de sedimentos, pero que tiende a presentar un estado de equilibrio.

La Figura 8-12 y la Figura 8-13 representan los cambios volumétricos [m<sup>3</sup>] para cada caso en estudio en relación a la coordenada este (Y). La línea roja representa la curva promedio para cada caso. En la primera se observa una clara tendencia de depositación, presentando un peak de 33 [m]. En la segunda se aprecia una dinámica distinta, presentando erosión con un peak de 25 [m]. Cabe destacar que las magnitudes producidas por el *tsunami* en el corto plazo son mayores que las regeneradas en el mediano plazo, puesto que aún existe acreción en el caso analizado después del *tsunami*.

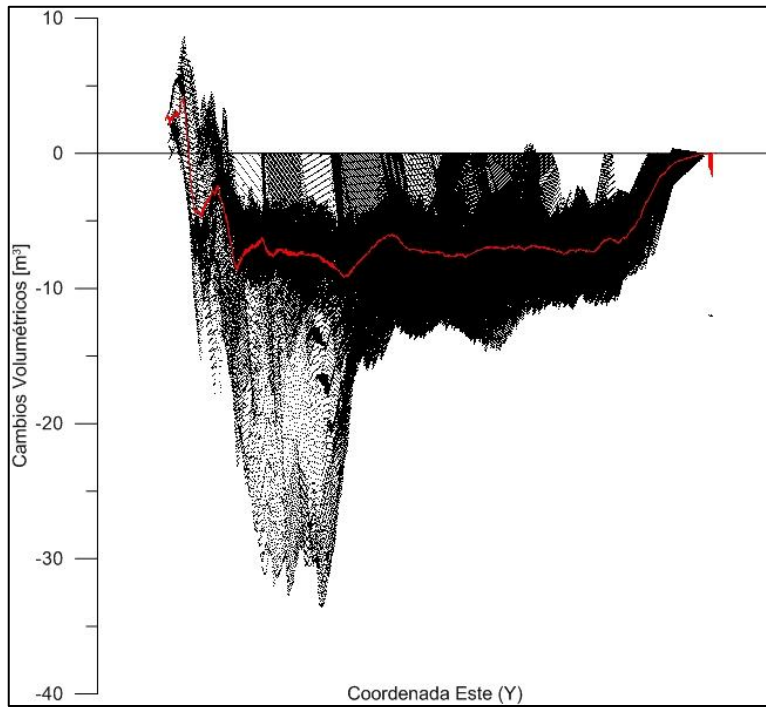
En la Figura 8-14 se representa las curvas promedio de los volúmenes para los 2 casos de estudio, de la cual se puede distinguir un cambio de tendencia en los sedimentos transportados, siendo el caso 2012-2011 el periodo donde existe erosión y el caso 2011-1993 el periodo donde se presenta acreción. Conforme con lo anterior, se infiere una clara tendencia al equilibrio en mediano plazo, presentando condiciones iniciales de acreción, debido al *tsunami*, y posteriormente de erosión 2 años después del evento.



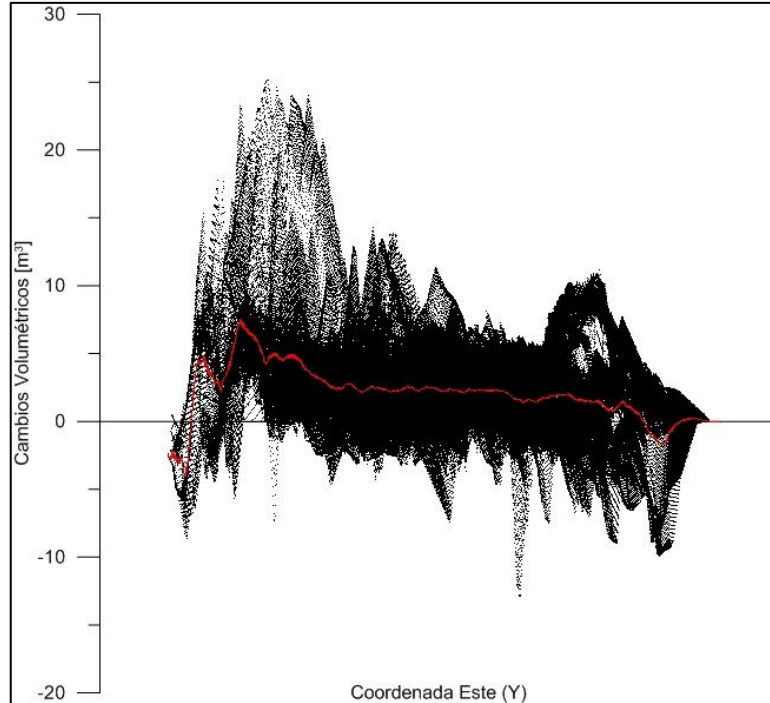
**Figura 8-10: Cambios Batimétricos [m], Caso 2011-1993.**  
Fuente: Elaboración propia.



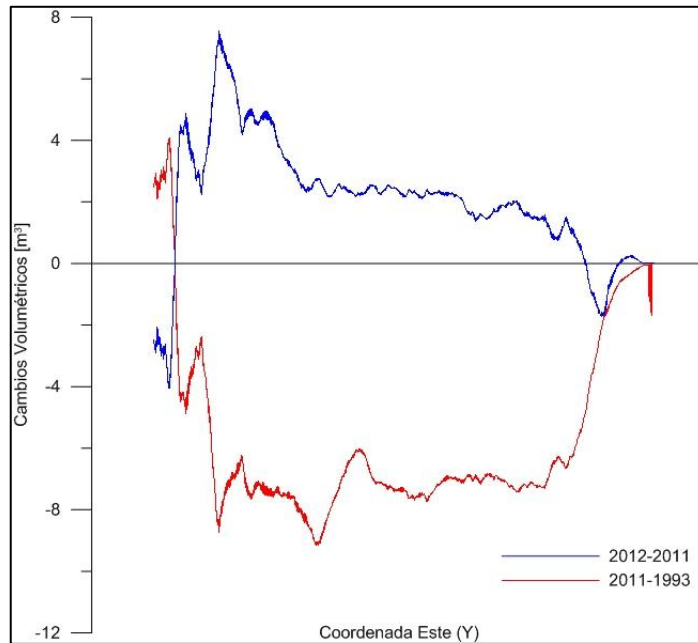
**Figura 8-11: Cambios Batimétricos [m], Caso 2012-2011.**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8-12: Cambios Volumétricos [m<sup>3</sup>], Caso 2011-1993.**  
 Fuente: Elaboración propia



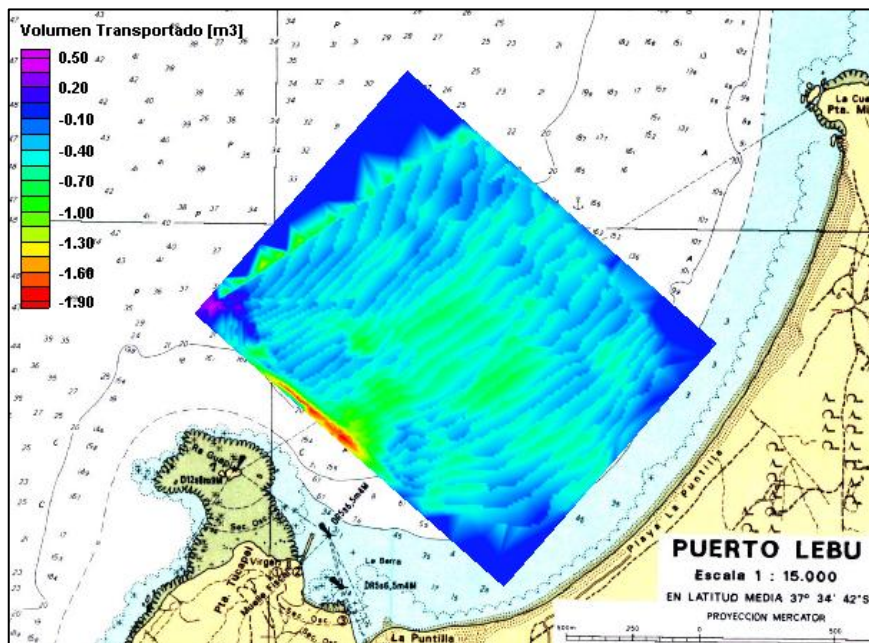
**Figura 8-13: Cambios Volumétricos [m<sup>3</sup>], Caso 2012-2011.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8-14: Comparación de Cambios Volumétricos.**

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8-15 se representa una grilla con el volumen transportado de sedimentos desde el año 1993 hasta el 2011. Para el caso de 2012-2011 la diferencia temporal es de 1 año, por lo el  $\Delta V$  será idéntico a los cambios batimétricos representados en la Figura 8-11.



**Figura 8-15: Volumen Transportado [m<sup>3</sup>], Caso 2011-1993.**

Fuente: Elaboración propia.

#### 8.4.2 CAMBIOS EN PERFIL

Una manera de ratificar los efectos del *tsunami* sobre la bahía y cuantificar los cambios transversales del sedimento de manera individualizada, es comparar temporalmente los perfiles según lo estipulado en la Figura 6-6. A continuación se representará la evolución para cada perfil.

Los perfiles se realizaron para 3 fechas, una de 1993 que representa las mediciones antes del *tsunami*, otra en Junio del 2011 y Marzo del 2012. Cabe destacar que los resultados se podrán ver afectados por no presentarse en la misma época estacional y los perfiles podrían adquirir la tendencia estacional normal de la zona de estudio, sin embargo, en términos globales muestran el proceso general, así como su tendencia.

En la Figura 8-16 muestra los 5 perfiles y el cambio transversal de la bahía en el tiempo. Las líneas rojas, azules y verdes representan las mediciones de 1993, 2011 y 2012 respectivamente.

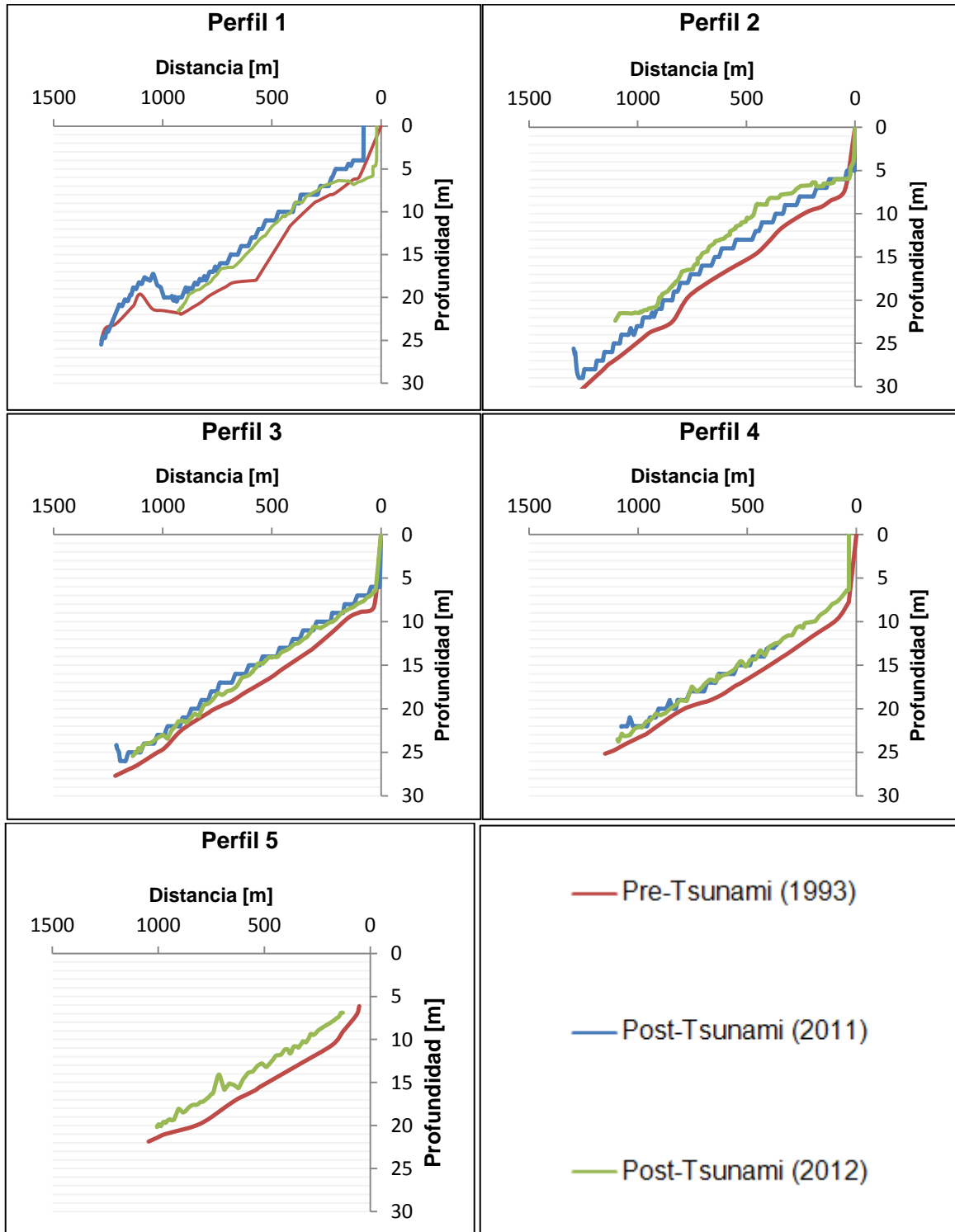
Del perfil 1 se puede inferir que una vez ocurrido el *tsunami* los niveles de sedimentos aumentaron a lo largo de toda la medición, destacando por cierto una pequeña barra en los 1100 [m] de distancia desde el punto de medición. La evolución natural de la bahía, incluyendo las eventualidades estacionales, ha tendido a la recuperación y al equilibrio, disminuyendo las cantidades de sedimento en el perfil.

En el perfil 2 se vislumbra una tendencia similar al perfil 1, destacando una disminución de la profundidad una vez ocurrido el *tsunami*, es decir, existe una condición de acreción. Sin embargo, para la medición realizada el año 2012, el perfil 2 no posee un aumento de profundidad como el perfil 1, sino una disminución considerable en el fondo. Los resultados en este caso se ven afectados debido a que la medición fue realizada en Marzo, periodo en donde la playa adquiere una tendencia de depositación y las probabilidades de existir eventos de clima extremo son bajas.

El perfil 3 y 4 presentan una dinámica similar, presentando un aumento en el nivel de sedimentos después de haber ocurrido el *tsunami*. Las mediciones de Marzo de 2012 adquirieron una tendencia de erosión en la zona, aumentando la profundidad como también presentando una condición de equilibrio en la playa.

La localización del perfil 5 no abarca las mediciones de batimetría de Junio de 2011, por lo que los resultados representarán solamente las otras 2. En este trazo se observa una condición de acreción en relación a la medición de 1993.

De esta forma, se infiere que el evento sísmico por subducción y el posterior *tsunami* que azotó la localidad, ha afectado los perfiles de la bahía en una condición de acreción en la mayoría de los casos. Luego en el mediano plazo los perfiles han adquirido una tendencia de equilibrio presentando condiciones de erosión, aun en periodos de verano, donde normalmente existe una depositación de sedimentos. De lo anterior, se corrobora una misma tendencia que el transporte de sedimentos, produciéndose un estado de equilibrio en el mediano plazo.



**Figura 8-16: Evolución Temporal de Perfiles.**

Fuente: Elaboración propia.

### 8.4.3 TRANSPORTE TOTAL DE SEDIMENTOS

La cuantificación del volumen que se transportó para los casos en análisis se encuentran representados en la Tabla 8-15. En ella se puede apreciar que durante la acción del *tsunami* (2011-1993) el transporte de sedimentos presentó un importante avance de volumen siendo 340 veces mayor al volumen erosionado. En cambio, para las mediciones posteriores se presenta un mayor volumen de erosión, 8,6 veces superior a volumen depositado. Sin embargo, cabe anunciar que la magnitud de depositación en la instancia del *tsunami* es 2,6 veces mayor al volumen erosionado en el año 2012, destacando la predominancia del maremoto en el corto plazo versus la tendencia al equilibrio en el mediano plazo.

**Tabla 8-15: Transporte Total de Sedimentos.**

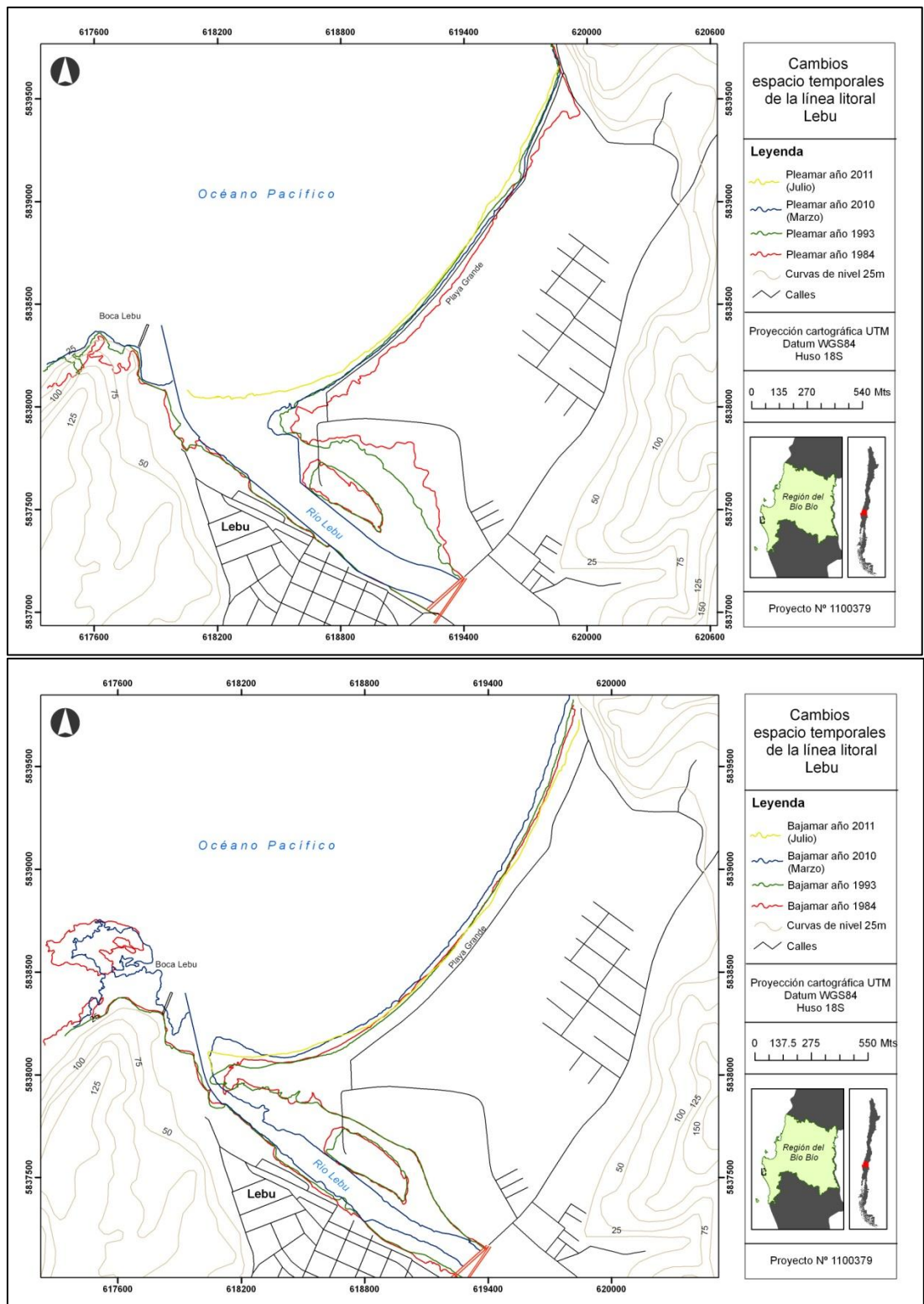
Años	Volumen Erosionado [m <sup>3</sup> ]	Volumen Depositado [m <sup>3</sup> ]	Volumen Total [m <sup>3</sup> ]	Transporte Total Q[m <sup>3</sup> /año]
2011-1993	9.465	3.226.928	3.217.463	178.748
2012-2011	1.236.171	143.834	1.092.337	1.092.337

Fuente: Elaboración propia.

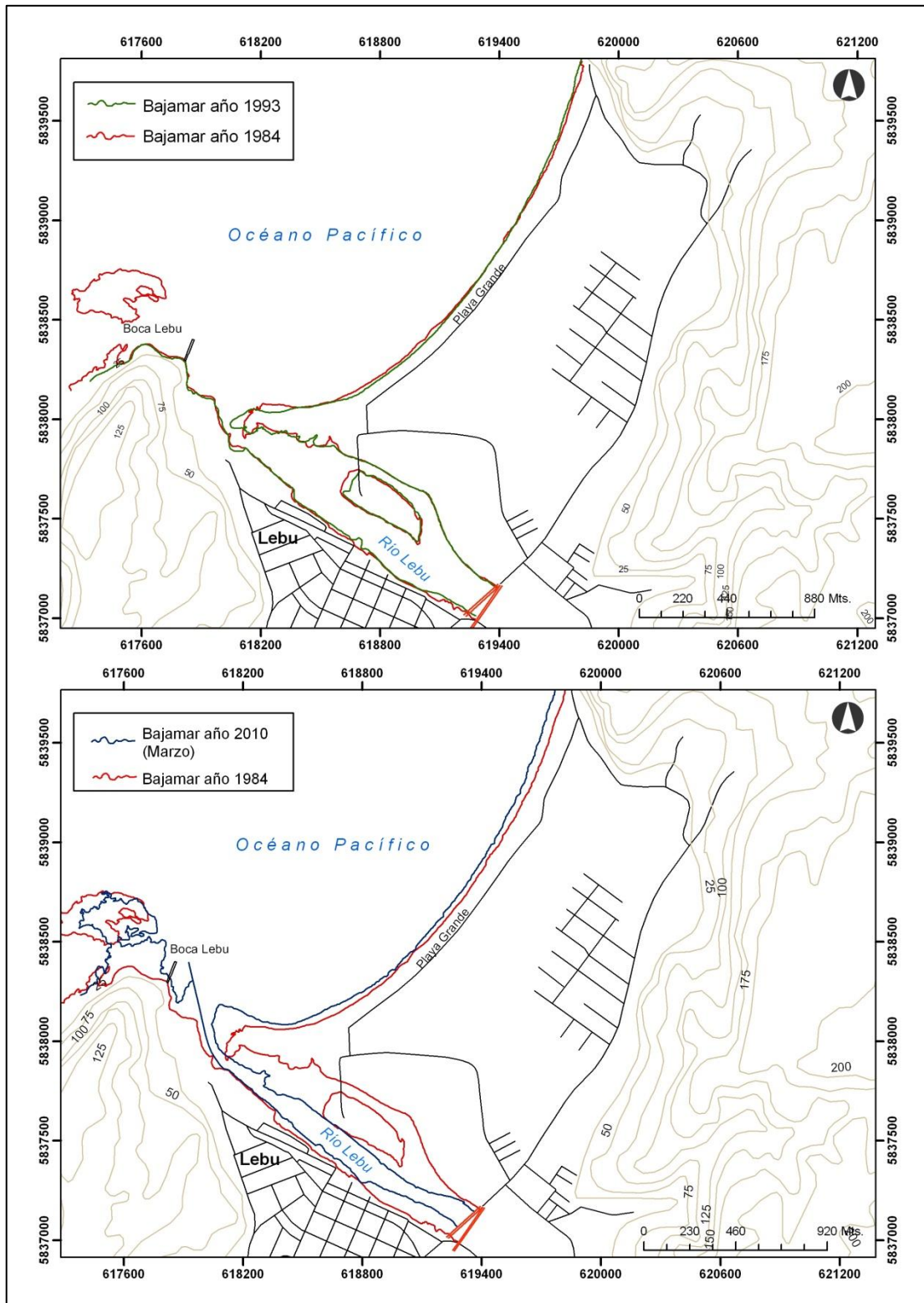
### 8.4.4 COMPARACIÓN CON ANÁLISIS FOTOGRÁFICO AÉREO

Por medio de un análisis georreferenciado se elabora una serie histórica de líneas litorales correspondiente a la bahía de Lebu para cuantificar los cambios espacio temporales del lugar. En la Figura 8-17 se representa los cambios en la línea de costa en donde se puede visualizar una evolución significativa una vez ocurrido el *tsunami* del 27/F de 2010. Para la condición de pleamar las líneas litorales permanecen literalmente ajustadas a una misma tendencia, excepto la medición de Junio de 2011 que presenta un avance importante en la playa. Por el contrario, la condición de bajamar deja explícito que los niveles de sedimentos en la bahía una vez transcurrido el maremoto, han aumentado considerablemente destacando la flecha en la desembocadura del río Lebu.

En la Figura 8-18 se representa los cambios en la línea litoral para una escala temporal más prolongada y para una escala temporal menos prolongada, expresión que clarifica de mejor manera la evolución histórica de la bahía y los cambios producidos por el *tsunami* en la medición de Marzo de 2010. De ella se puede inferir que la dinámica de las líneas litorales para los años de 1993 y 1984 presenta un ajuste similar. Sin embargo para las mediciones de 1984 y 2010 se visualiza un avance importante en la playa y en la morfodinámica de la bahía, la que sería debida al avance costero del *tsunami*.



**Figura 8-17: Cambios Espacio Temporales de la Línea. Arriba Pleamar, abajo Bajamar**  
Fuente: Dra. Carolina Martínez.



**Figura 8-18: Cambios Espacio Temporales de la Línea Litoral en Bajamar.**  
 Fuente: Dra. Carolina Martínez.

## 8.5 TRANSFERENCIA DE OLAS

En este apartado se presentan los resultados de la modelación numérica para los casos *pre-tsunami* y *post-tsunami* mediante el software STWAVE. Además se expresan los cambios de los coeficientes de Shoaling y las direcciones de aguas someras en relación al periodo y dirección en aguas profundas.

### 8.5.1 PRE-TSUNAMI

Las modelaciones que se realizaron para los 3 casos estipulados (Tabla 7-1), fueron 70. En la Figura 8-19 se representa los resultados de la modelación numérica de STWAVE, con las siguientes condiciones:

- $H_{m0}$  : 1.0[m]
- Dirección : W
- $T_p$  : 14 [s]

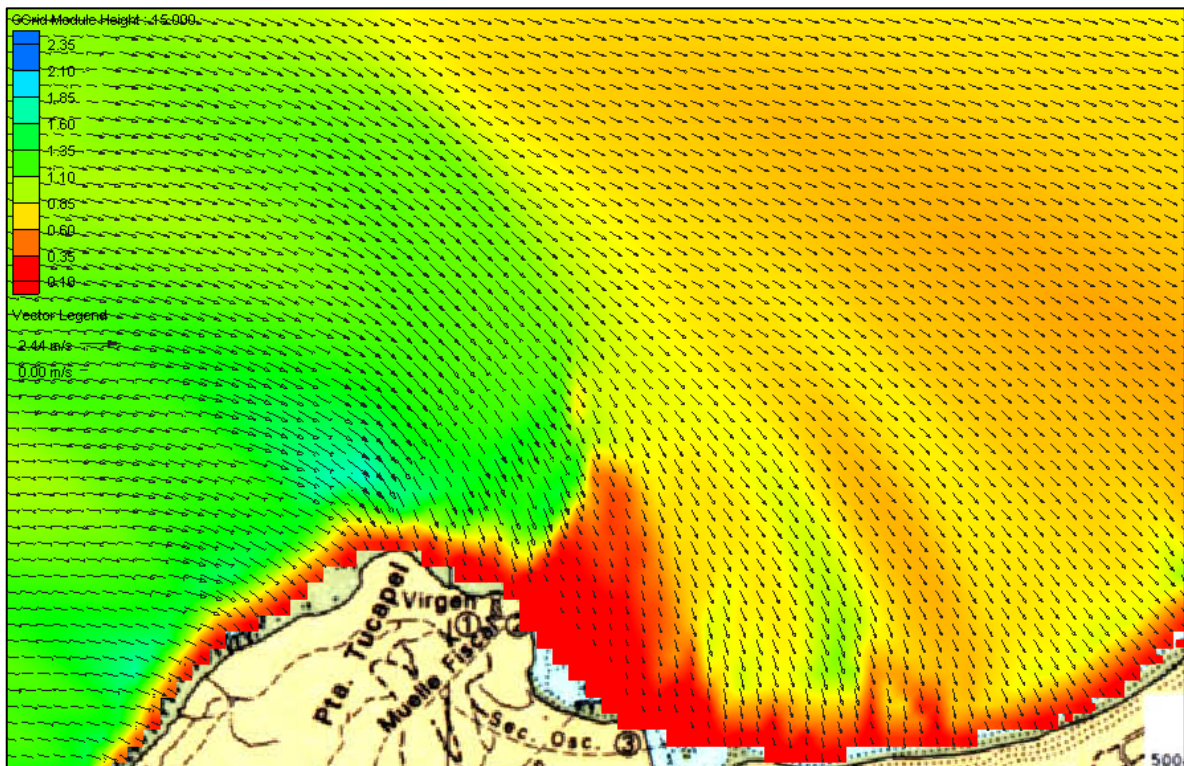
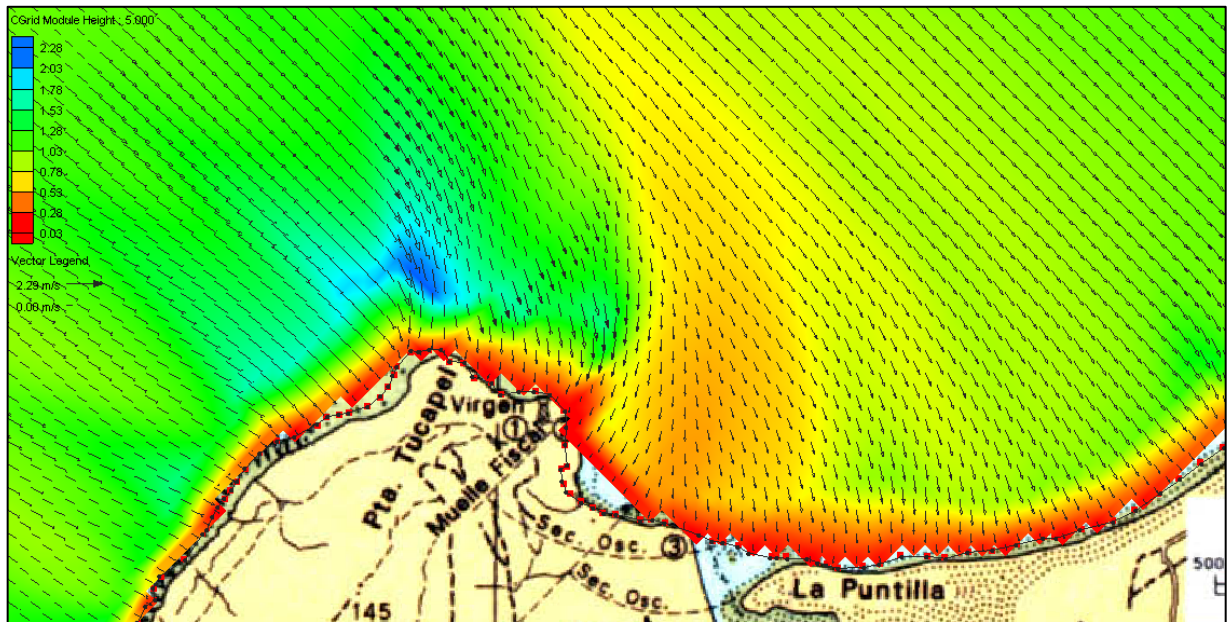


Figura 8-19: Resultado Modelación Pre-Tsunami:  $H_{m0}=1[m]$ ;  $T_p=14[s]$ ; MWD=W.

Fuente: STWAVE.

Para ratificar los cambios en la dirección de oleaje propagado hacia aguas someras, se representa la Figura 8-20, la cual estipula el modelo con orientación del NW.



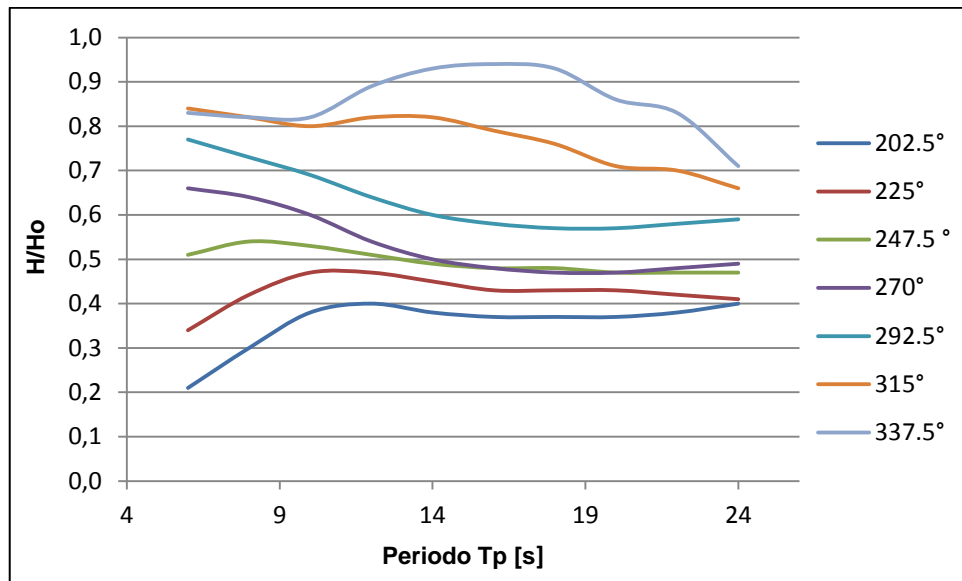
**Figura 8-20: Resultado Modelación Pre-Tsunami:  $H_{m0}=1[m]$ ;  $T_p=14[s]$ ; MWD=NW.**  
 Fuente: STWAVE.

Según lo expuesto, se puede visualizar que en la Punta Tucapel, se presentan fenómenos de difracción y refracción, destacando que en orientaciones provenientes del NW existen mayores magnitudes de velocidades (ver vectores) en la zona de sombra en comparación con el frente de oleaje proveniente del W. Cabe distinguir además que las componentes de dirección para la magnitud de velocidad, tienden a orientarse a la dirección  $295[^\circ]$  en el interior de la bahía. Con respecto a la altura de ola, ésta presenta un aumento en la punta de la ensenada y una disminución en la desembocadura del río con respecto a su flujo de corriente.

Luego de haber ejecutado el modelo, se construyeron las funciones de transferencia. De esta forma, las 70 condiciones agregadas desde aguas profundas fueron reordenadas para cada parámetro. Véase en el Anexo Olas, Tabla 11-5 para mayor detalle.

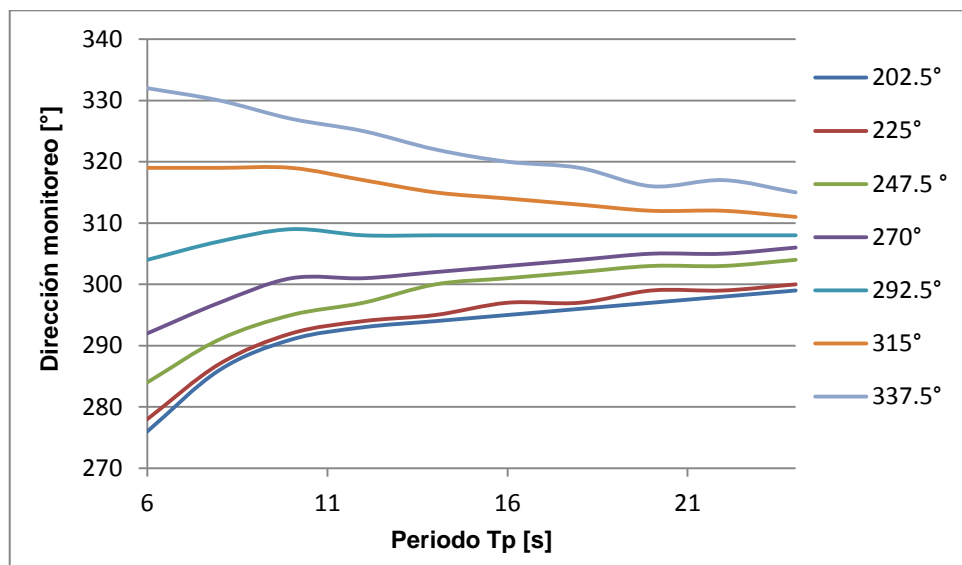
Los valores de los parámetros permiten calcular el coeficiente de Shoaling y refracción. Este indica que la altura de ola se acerca al infinito en aguas someras y que en ciertas profundidades se hace inestable y presentará rotura, disipando su energía en turbulencia y fricción en el fondo (G. Dean & A. Dalrymple, 1991).

Las funciones de transferencia de las alturas y las direcciones de olas en aguas profundas en relación al coeficiente de Shoaling, se representa en la Figura 8-21. Para el caso de las direcciones de ola, las funciones de transferencia se aprecian en la Figura 8-22.



**Figura 8-21: Coeficiente de Shoaling en relación al Periodo y Dirección offshore, caso Pre-Tsunami.**

Fuente: Elaboración propia.



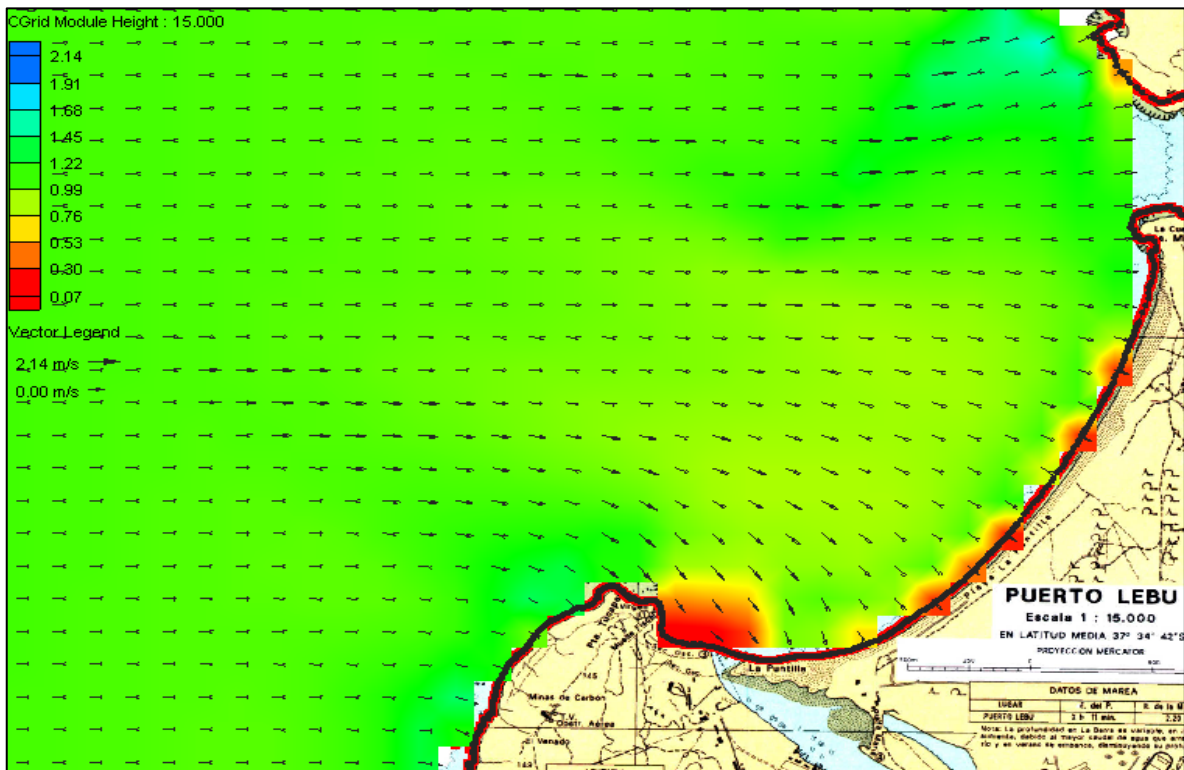
**Figura 8-22: Dirección de aguas someras en relación al Periodo y Dirección offshore, caso Pre-Tsunami.**

Fuente: Elaboración propia.

## 8.5.2 POST-TSUNAMI

Al igual que el caso *Pre-Tsunami* se realizaron las modelaciones de los 3 casos de grilla. Los parámetros utilizados en la Figura 8-23 son:

- Hmo : 1.0[m]
- Dirección : W
- Tp : 14 [s]



**Figura 8-23: Resultado Modelación Post-Tsunami: Hmo=1[m]; Tp=14[s]; MWD=W.**

Fuente: STWAVE.

Posteriormente se verificó los resultados modificando solo el parámetro direccional, que proviene desde el NW. En la Figura 8-24 se representa los cambios en las modelaciones. Los parámetros utilizados son:

- Hmo : 1.0[m]
- Dirección : NW
- Tp : 14 [s]

Los resultados de las funciones de transferencia para las direcciones y para los valores de altura de ola se encuentran expresados en los Figura 8-25 y Figura 8-26.

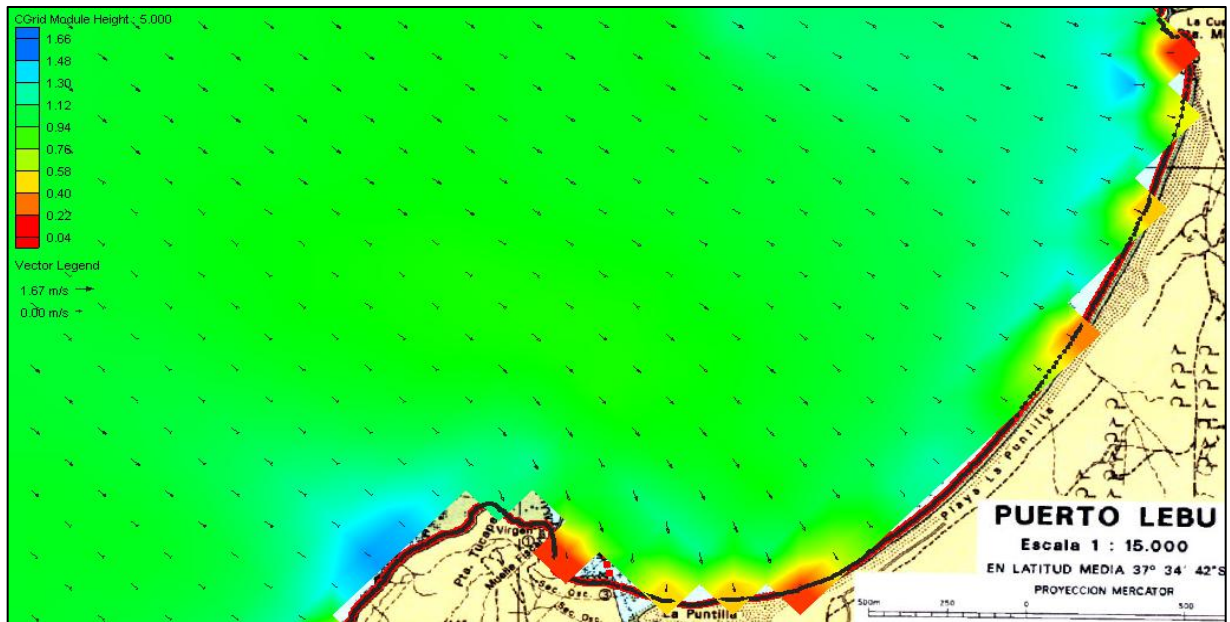


Figura 8-24: Resultado Modelación Post-Tsunami:  $H_{m0}=1[m]$ ;  $T_p=14[s]$ ; MWD=NW.  
Fuente: STWAVE.

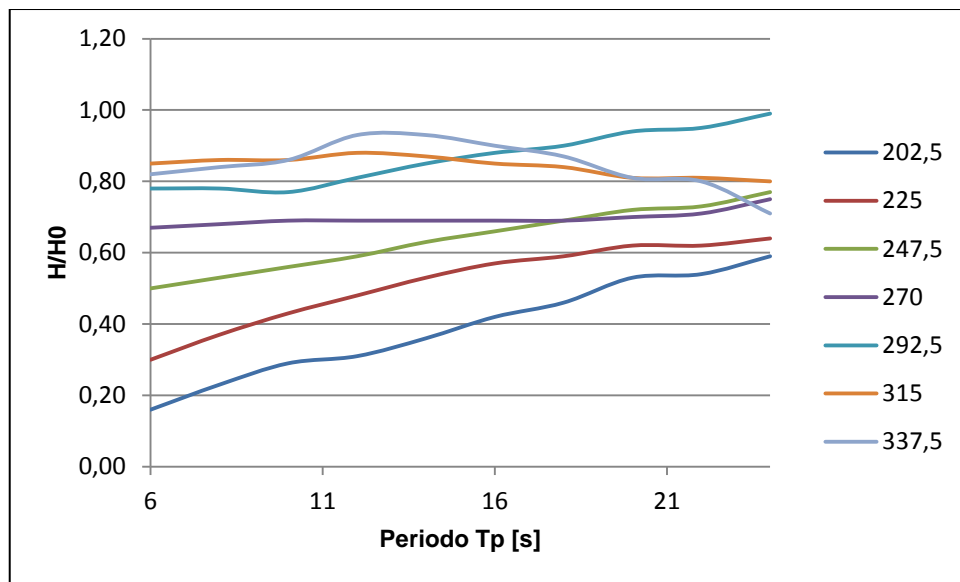
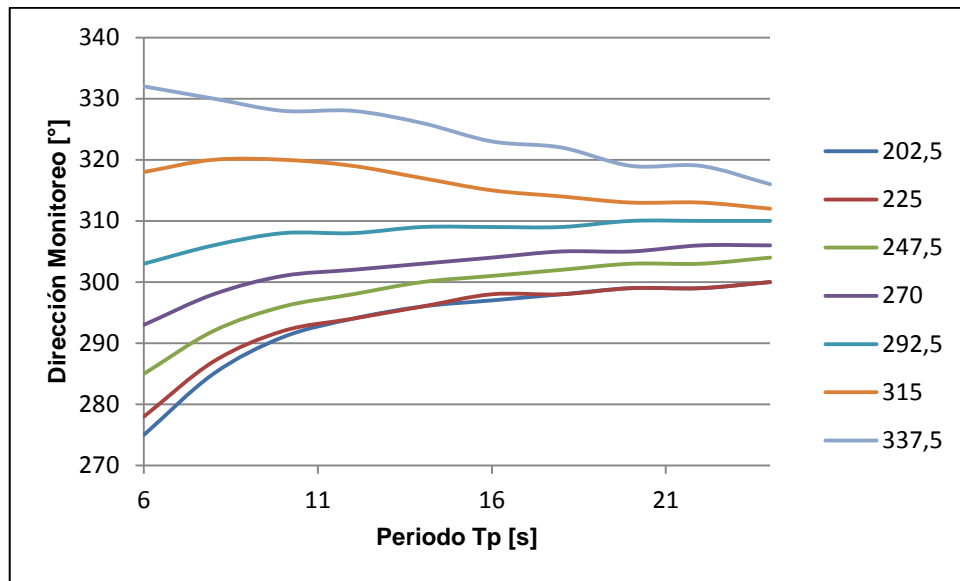


Figura 8-25: Coeficiente de Shoaling en relación al Periodo y Dirección *offshore*, caso Post-Tsunami.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8-26: Dirección de aguas someras en relación al Período y Dirección *offshore*, caso *Post-Tsunami*.**

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados para el caso de *Post-Tsunami* se infiere que los fenómenos de difracción contienen similitudes con el caso *Pre-Tsunami* presentando orientaciones en la dirección  $300[^\circ]$  en el caso de la grilla NW. Los valores de las funciones de transferencia se encuentran en la Tabla 11-6, en la sección de anexos.

## 8.6 CLIMA DE OLEAJE OPERACIONAL

El cálculo del clima operacional se efectuó para determinar los parámetros necesarios del oleaje en los 2 casos de estudio y así realizar una comparación tanto espacial como temporal. Es menester para el cálculo del clima operacional, las alturas de olas significativas como también las direcciones medias de oleaje. De esta manera se calculó rosas de direcciones para datos dispersivos y para datos agrupados, especificando las alturas de ola mediante rangos coloreados. Los datos para la generación de las rosas disponen de 30 años de registro.

También se obtuvieron curvas de excedencia, histogramas y tablas de incidencia que detallaron los datos aglomerados en una marca de clase en específico con rangos de alturas de ola y direcciones.

### 8.6.1 PRE-TSUNAMI

Los análisis efectuados antes del *tsunami* fueron estudiados a partir de tablas de incidencia, las cuales representan la ocurrencia de datos a partir de parámetros como la altura significativa ( $H_{mo}$ ), dirección media espectral (MWD) y periodo peak ( $T_p$ ).

En la Tabla 11-7 de la sección Anexo Clima de Oleaje Operacional, se expone la frecuencia de datos de  $H_{mo}$  y el  $T_p$ , en donde se visualiza que la mayor marca de clase de las alturas de ola corresponden al 41,71% y es de 1 a 1,5 [m]. El 84,63% de  $H_{mo}$  pertenece al rango que va desde 0,5 a 2 [m]. La altura máxima del registro fue de 5,24 [m].

El 35,81% de los periodos corresponden entre los 12 y 14 [s] y es el rango con mayor aglomeración de frecuencias. El 83,34% de las ocurrencias de periodos se especificaron entre los 10 y 16 [s].

De forma consecutiva, los intervalos de altura de ola y periodo más concentrados fueron de 1 a 1,5[m] y de 12 a 14[s] respectivamente con un 16, 34%.

En la Tabla 11-8, se representa una tabla de incidencia con MWD y alturas de ola. En ella se expresa que el oleaje predominante proviene desde las direcciones 295 y 300 [°] con un 41,79% de ocurrencias. De esta misma manera, el 85,32% del oleaje posee una orientación desde los 285 a 300[°].

Para una visualización más global de la incidencia del oleaje para los 30 años de registro, se dispuso de rosas direccionales para datos dispersivos como para datos agrupados. En la Figura 11-8 (Anexo Clima de Oleaje Operacional) se representa las rosas direccionales que poseen una orientación marcada entre el WNW y NW.

Las orientaciones obtenidas por el clima operacional, representan varias conclusiones, debido a que el oleaje reinante en las costas chilenas proviene del SSW y SW. Los resultados de las direcciones medias espectrales derivan de los parámetros de resumen obtenidos por la transferencia espectral. Al propagar el oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras, el frente de direcciones se verá afectado por diversos fenómenos físicos. Como el estudio se enfoca en la bahía de

Lebu, ésta presenta una cúspide llamada “Punta Tucapel”, la cual afectará el frente de oleaje reinante de la zona y modificará la orientación de la dirección de aguas profundas (Figura 8-19).

En la Figura 11-9 (Anexo Clima de Oleaje Operacional) se expone la probabilidad de excedencia que una ola sobrepase cierto límite de altura. En esta ocasión, los resultados de la curva representan una excedencia mayoritaria de alturas en el rango de 1 a 1,5[m]. El 77,68% excede 1[m] y 1,97% los 3[m].

## 8.6.2 POST-TSUNAMI

El procedimiento y análisis para el caso post-*tsunami* se efectuó de la misma manera que para el caso pre-*tsunami* utilizando rosas direccionales, como curvas y tablas de incidencia.

En la Tabla 11-9 de la sección Anexo Clima de Oleaje Operacional, se representa la incidencia de las frecuencias de las alturas de ola [m] en relación al periodo de onda [s]. Se puede distinguir que el 90,39% de las ocurrencias en Hmo se encuentran entre 0,5 y 2,5 [m]. El rango que posee una mayor conglomeración de frecuencias es la comprendida entre 1 y 1,5 [m] con un 37,26%. Consecutivamente, la altura máxima que se registró fue de 6,08 [m] para los 30 años de registro.

En el caso del periodo de ola, el 90,81% de las ocurrencias se concentran entre los 10 y 18[s]. El 64,8% entre los 12 y 16[s] destacando que después del evento sísmico y posterior *tsunami* los periodos de ola aumentaron, entre el rango de 14 y 24[s], en un 10,79%.

Para verificar la incidencia de las direcciones de oleaje se elaboró la Tabla 11-10, que representa las frecuencias de MWD y el Tp. De ella se infiere que el 87,36% de las orientaciones provienen desde el 290[°] hasta el 305[°]. Otra forma de visualizar la dirección del oleaje es mediante la Figura 11-10, la cual demuestra que el oleaje proviene únicamente desde el WNW y NW.

La Figura 11-11 expresa una curva de excedencia que representa la altura de ola en función de la ocurrencia de los datos. De esta forma, el 81,23% excede 1[m] y 3,8% sobrepasa los 3[m].

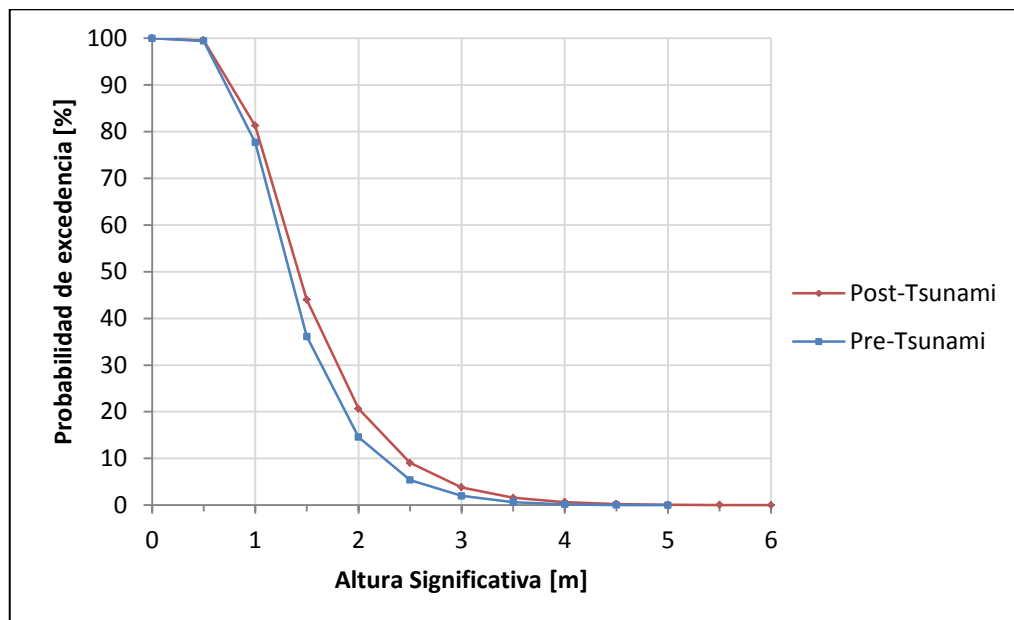
### 8.6.3 COMPARACIÓN CLIMAS DE OLA

Para comprobar y analizar probables cambios del clima de olas dentro de la bahía de Lebu, antes y después del *tsunami* del 27/F de 2010, se dispuso a realizar comparaciones para verificar cambios en la altura de ola, periodos y direcciones. Cabe destacar que estos cambios se deberían a modificaciones del fondo y no se ha incorporado variación en la base de datos de aguas profundas.

Para atender posibles cambios en la altura de ola, se comparó las curvas de excedencia de las dos condiciones. La Figura 8-27 representa tales cambios, y se infiere que para la altura 1,5 [m] hubo un aumento de un 7,8% en relación a los eventos relacionados antes del *tsunami*. Para la altura 2[m] existió un incremento de 6,13% y para los 3[m] un aumento de 1,83%. El oleaje es similar para ambos casos, destacando que después del *tsunami* las alturas de ola presentan un leve incremento en su magnitud.

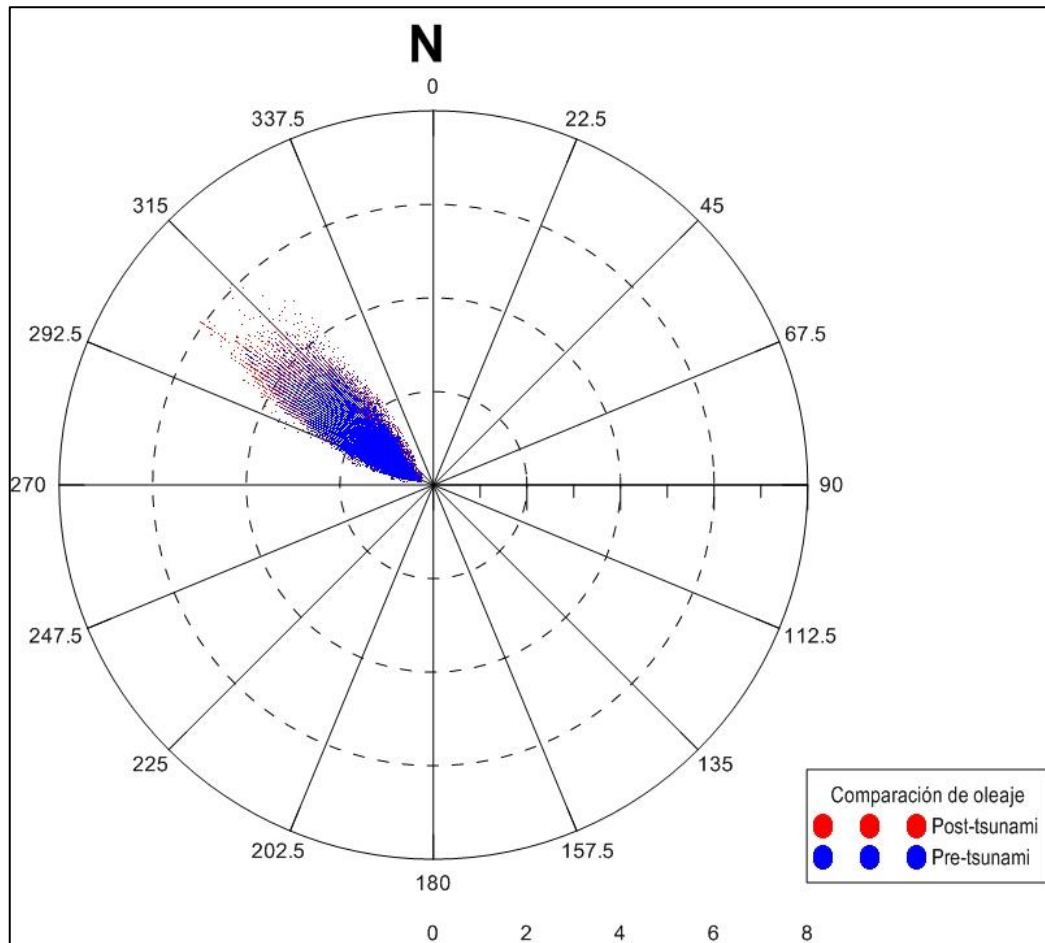
Los frentes de oleaje para los 30 años de registro poseen una dirección similar entre los casos, debido a los fenómenos físicos que la bahía presenta. Para una visualización de las orientaciones, se elaboró la Figura 8-28, que representa una rosa direccional con datos dispersivos.

La Figura 8-29 representa 2 histogramas de frecuencia relativa en función de la altura de ola y los periodos. En ella se visualiza que la mayor conglomeración de valores se registra entre los 8 y 10[s] para los periodos y 1 a 1,5 [m] en el caso de las alturas. No obstante, los cambios producidos por el *tsunami* modificaron los periodos, siendo estos mayores después del evento marítimo. En cambio, las alturas de ola presentan un aumento en la frecuencia a medida que Hmo aumenta en el caso post-*Tsunami*.



**Figura 8-27: Comparación curvas de excedencia.**

Fuente: Elaboración propia.

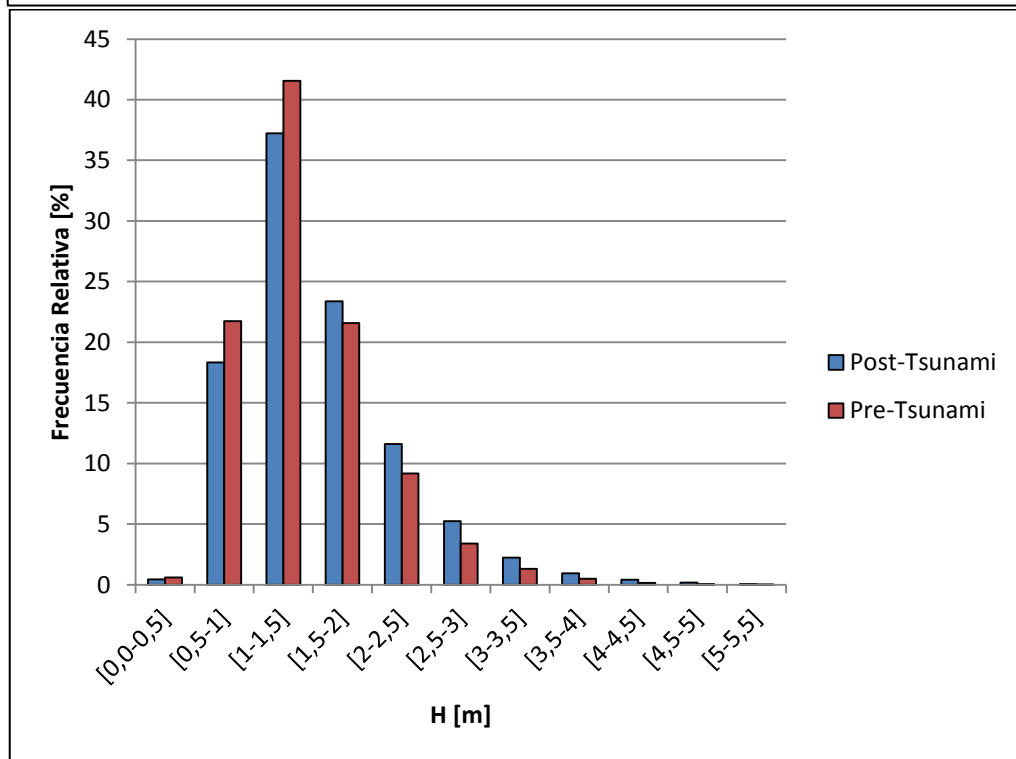
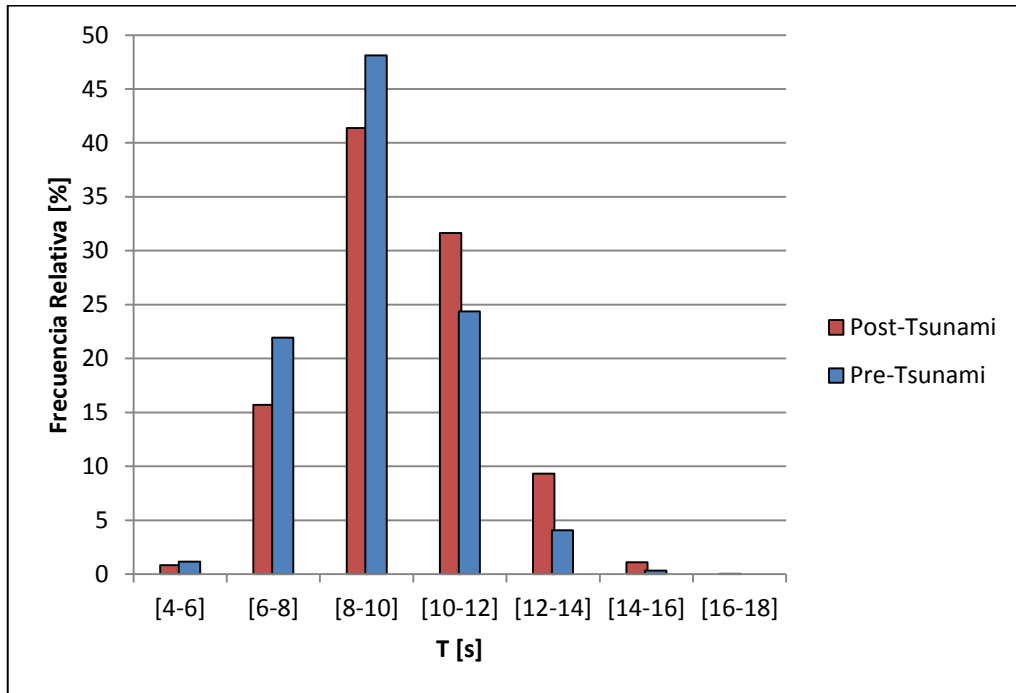


**Figura 8-28: Comparación de oleaje mediante rosas direccionales.**

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se concluye que los periodos de ola para el caso de *pre-tsunami* son más pequeños en comparación a lo ocurrido después del *tsunami* y las alturas de ola presentaron cambios en sus magnitudes y tendieron a aumentar levemente después del evento tectónico.

Con respecto a los resultados de las direcciones en el punto de monitoreo de acuerdo a la propagación de oleaje para los 2 casos, éstas presentan una orientación entre los 292.5 y 337.5 [°], dejando estipulado que el fenómeno hidráulico no cambia las condiciones de la orientación del frente de oleaje en la profundidad de 10 [m].



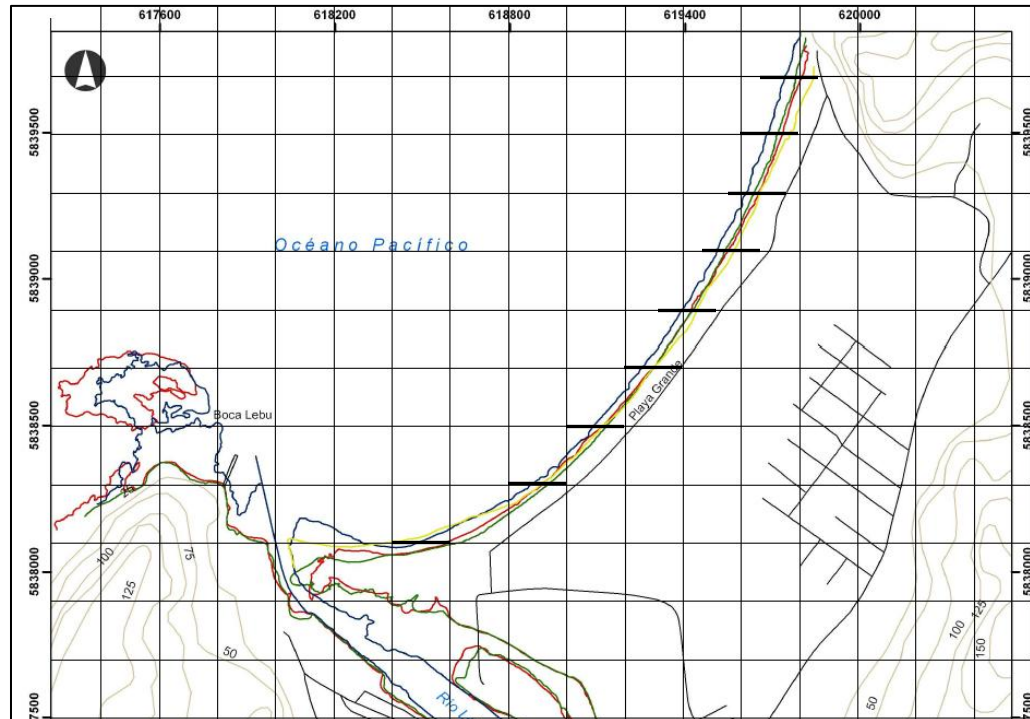
**Figura 8-29: Histogramas de Frecuencia relativa en función de Hmo [m] y Tp [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.

## 8.7 EVOLUCIÓN LÍNEA LITORAL

### 8.7.1 AJUSTE LOGARÍTMICO MEDIANTE SMC (U. DE CANTABRIA)

A continuación se presenta los resultados de los ajustes para el modelo logarítmico realizado mediante la herramienta de medición SMC en la bahía de Lebu.

Los cálculos se realizaron cada 200 [m] por la línea litoral para lograr representatividad en los resultados según lo estipulado en la Figura 8-30.



**Figura 8-30: Espaciamiento de 200 [m] entre cada medición.**

Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros que se utilizaron para los ajustes del modelo logarítmico fue un ángulo  $\alpha = 33[^\circ]$ , ya que era el que mayor se aproximaba a las líneas litorales.

Cabe destacar que el modelo logarítmico presenta pobres ajustes en las zonas alejadas de la playa, ya que matemáticamente la espiral logarítmica es menos curva con un ángulo  $\alpha$  mayor. Es de anunciar además que cuando el punto de control coincide con el punto de difracción el modelo experimenta buenos ajustes en la zona curva de la espiral, pero se aleja en la zona recta.

La línea litoral para una serie histórica de 27 años presentó diversas modificaciones a lo largo del tiempo, debido a acciones estacionales y transporte en el sedimento de la playa. Para el año 1984 la línea litoral se ajusta correctamente en la zona sur y media de la bahía, presentando un desajuste de retroceso en la zona norte (Figura 8-31).

Para el año 1993 (*Pre-Tsunami*) la línea litoral se ajusta adecuadamente con el modelo logarítmico, presentando un retroceso pequeño en la playa a lo largo de la bahía, pero menos ajustado en la zona norte (Figura 8-32).

El año 2010 (*Post-Tsunami*) la línea litoral presenta un cambio radical en comparación con las mediciones anteriores, debido a ser una muestra un mes posterior al *tsunami* del 27/F. La línea litoral presenta un avance significativo en la zona sur y media; y un pobre ajuste en la zona norte. La zona de desembocadura de la bahía presenta además un avance en la flecha debido al transporte de sedimento generado por el tsunami. Véase Figura 8-33.

El año 2011 presenta solo un adecuado ajuste en la zona sur de la bahía, el resto de la playa presenta pobres aproximaciones.

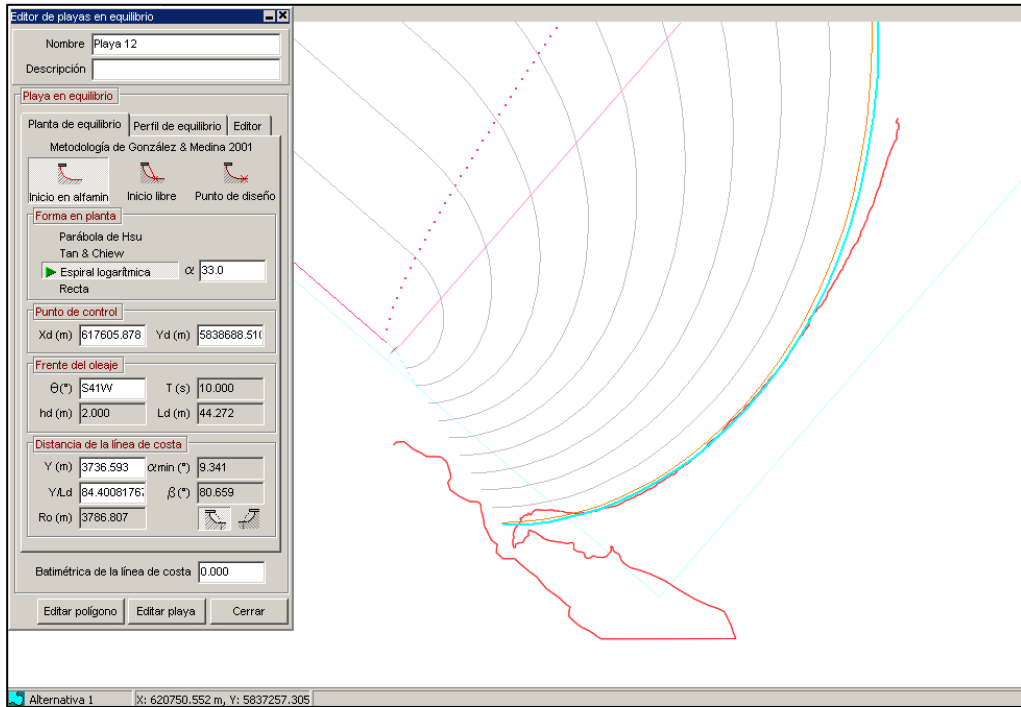
Para cuantificar la cantidad de metros que avanzó y retrocedió la línea de costa se dispone de la Tabla 8-16 para todos los años en estudio. De ella se infiere que desde los 1400 a los 1800[m] equivalente a la zona norte de la bahía, las líneas expresan un desajuste importante con respecto con el modelo logarítmico. Sin embargo, la consideración más relevante es el avance de la línea litoral para el año 2010, con 11,2 [m] promedio en relación al retroceso de -35.8, -35.6 y -24.4 [m] los años 1984, 1993 y 2011 respectivamente. Cabe destacar que estos resultados reflejan además un mejor ajuste con la línea del año 2010.

De lo anterior, se infiere que las líneas litorales los años 1984 y 1993 presentan una tendencia similar, pero una vez ocurrido el *tsunami* del 27/F de 2010, la línea litoral tendió al avance. Cabe señalar que la acumulación de sedimentos en la bahía es procedente, en gran mayoría, de la plataforma continental. Esto además se corrobora por el transporte de sedimentos y la condición de acreción que adquirió la bahía una vez ocurrido el evento.

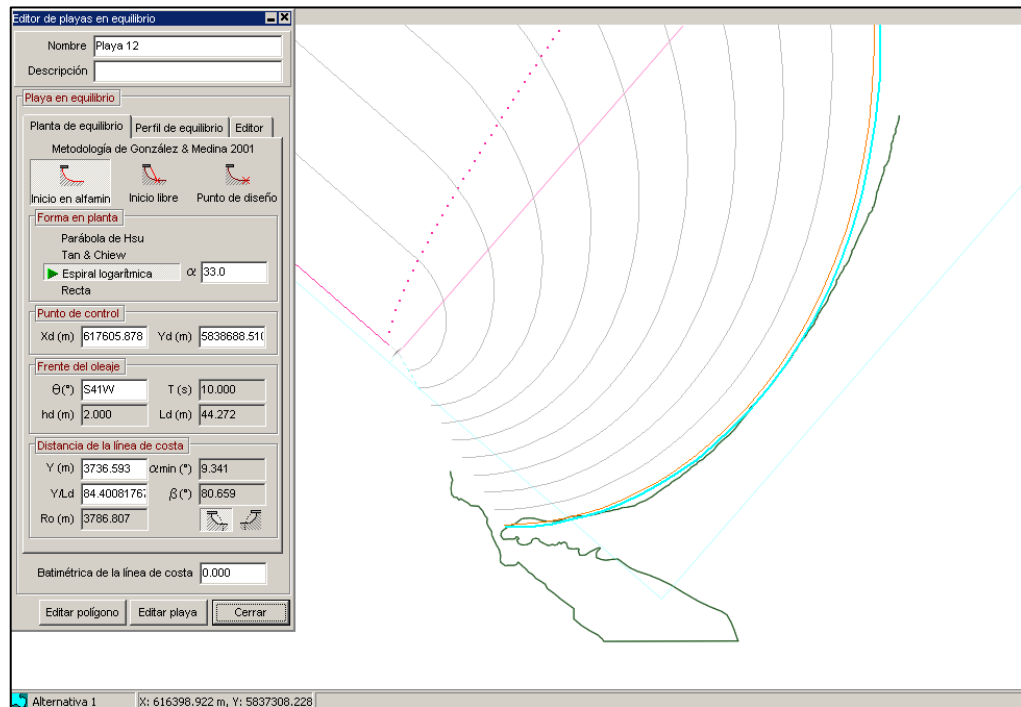
La cuenca del río Lebu aporta en la modificación de la flecha litoral con las mayores avances en el sedimento en la zona sur de la bahía con un aumento de 177 [m] para el año 2011.

Para corroborar un estado de equilibrio en la bahía se dispuso de la medición de Junio de 2011 que refleja un retroceso en la línea y un escaso ajuste con el modelo logarítmico. Los cambios estacionales afectan los resultados en el perfil, pero reflejan resultados significativos en relación a la línea litoral.

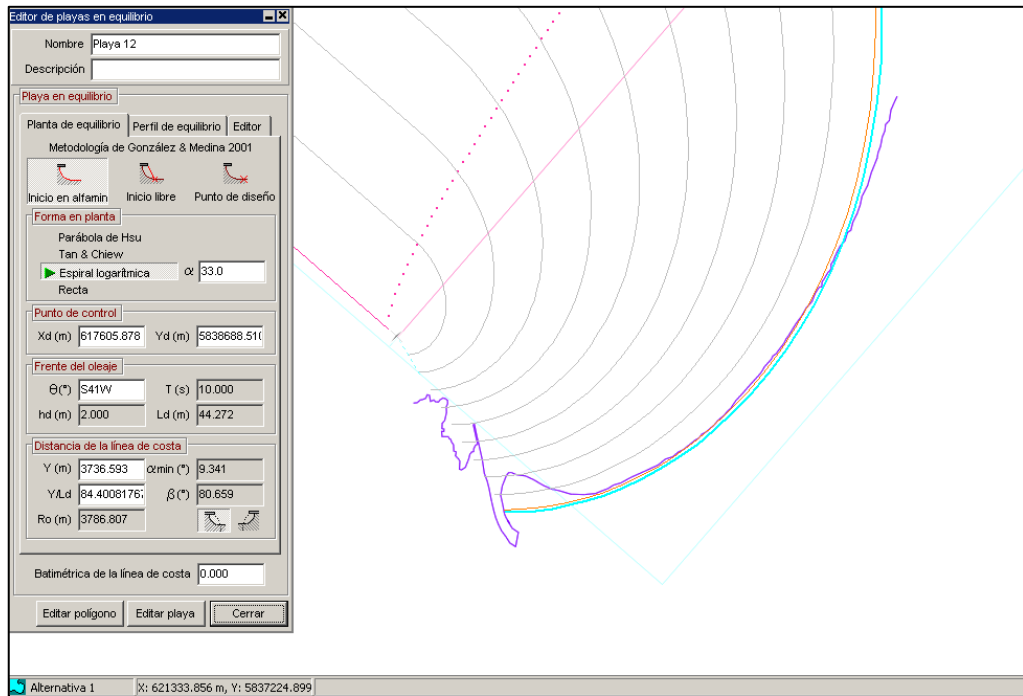
El retroceso de la línea litoral el año 2011 deja en manifiesto que la bahía de Lebu se encuentra en equilibrio por presentar una tendencia de condición inicial considerando los avances por terremoto de subducción.



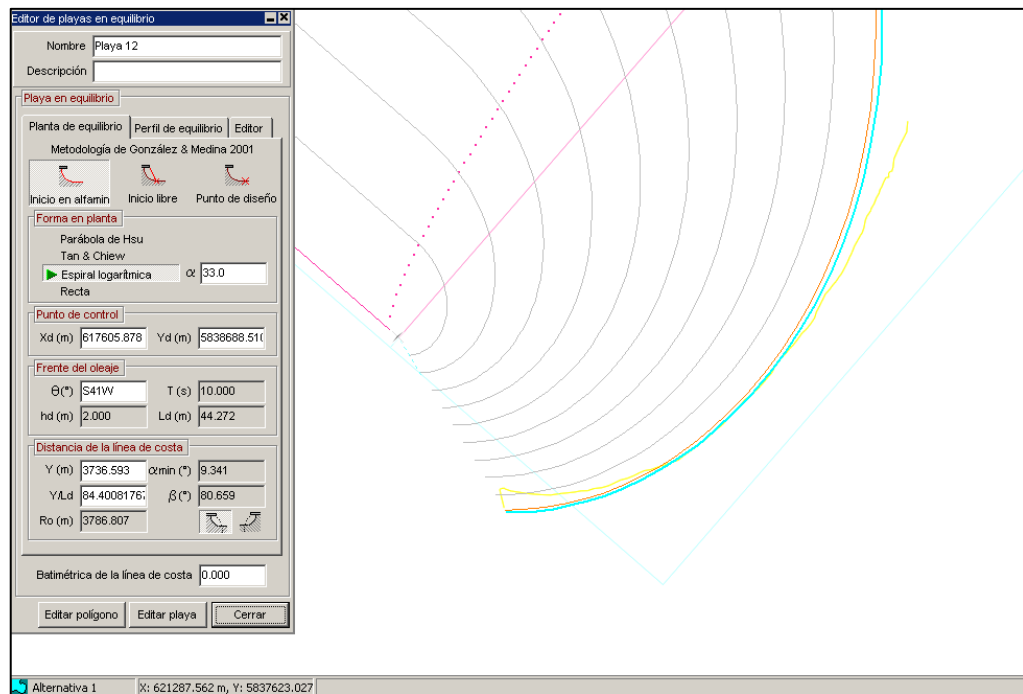
**Figura 8-31: Ajuste Logarítmico para año 1984 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.



**Figura 8-32: Ajuste Logarítmico para año 1993 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.



**Figura 8-33: Ajuste Logarítmico para año 2010 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.



**Figura 8-34: Ajuste Logarítmico para año 2011 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.

**Tabla 8-16: Cambios en la Línea Litoral de la Bahía de Lebu por Medio de Ajuste Logarítmico.**

<b>Distancia [m]</b>	<b>1984</b>	<b>1993</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
200	-38.4	-70.3	59.7	177.3
400	-5.2	-21.8	29.3	-4.5
600	10.4	-4.1	40.5	8
800	0.2	0.1	38.7	-2.1
1000	-8.1	-10.9	26.3	-25.4
1200	-30.9	-18.9	11.2	-53.8
1400	-58.8	-41.5	-14.9	-63.2
1600	-81.6	-66.7	-30.7	-107.3
1800	-109.5	-86.3	-52.9	-148.7
<b>Promedio</b>	<b>-35.8</b>	<b>-35.6</b>	<b>11.9</b>	<b>-24.4</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 8.7.2 AJUSTE PARABÓLICO MEDIANTE SMC (U. DE CANTABRIA)

El ajuste parabólico se realizó mediante el SMC de la Universidad de Cantabria según la metodología de Medina *et al.*, (2001). Este ajuste matemático requiere necesariamente el flujo medio de energía anual y de esta forma determinar los puntos de control óptimos para las líneas litorales.

Se ajustó el modelo con una orientación  $\theta$  de 227 [°] con el punto de control situado en las coordenadas  $X_d = 617289.423$  e  $Y_d = 5838782.084$  [m]. El modelo parabólico usado es el de Hsu.

En la Figura 8-35 se representa el ajuste parabólico para el año 1984, del cual se puede inferir que existe una importante correlación con la línea litoral, ya sea para la zona sur, media y norte de la bahía. Para el año 1993 los resultados son muy similares al de 1984 con la diferencia que en la zona sur existe un leve retroceso en la playa con respecto al modelo (Figura 8-36).

El caso de Marzo de 2010 el ajuste se correlaciona correctamente con la línea litoral, logrando una alta tendencia en sus resultados a lo largo de la bahía (Figura 8-37). Por el contrario la Figura 8-38 representa el ajuste para Junio de 2011 que expresa una pobre aproximación, presentando retroceso en gran parte de la playa.

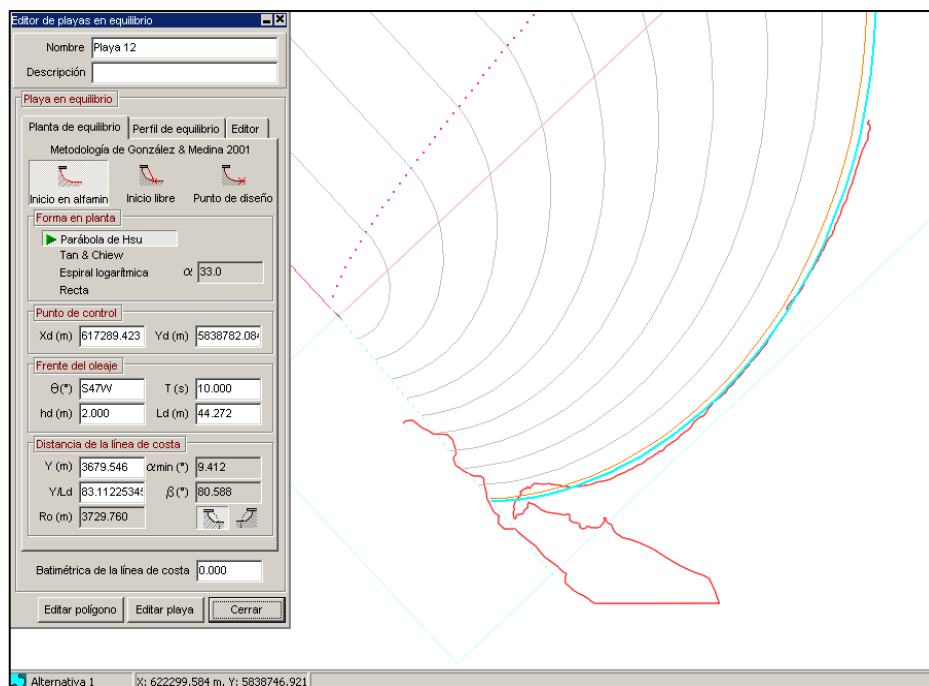
Al igual que el modelo logarítmico, el modelo parabólico no representa cambios morfodinámicos a causa de desembocaduras de río y los efectos que el transporte de sedimentos de la cuenca hidrográfica aporta, es por ello que en la zona sur de la bahía para todas las fechas en estudio, se presenta un avance importante en la línea litoral.

La Tabla 8-17 representa los cambios de las líneas litorales para la serie histórica de 27 años. De ella se infiere que la línea litoral del año 2010 es la que presenta mayores índices de avance con 22.2 [m] promedio. Por otro lado, los años 1984 y

1993 presentan una tendencia similar y un ajuste aproximado al modelo parabólico. En Junio de 2011 la línea litoral presenta retrocesos importantes en relación al ajuste parabólico, debido a los cambios estacionales y de presentarse en época estival.

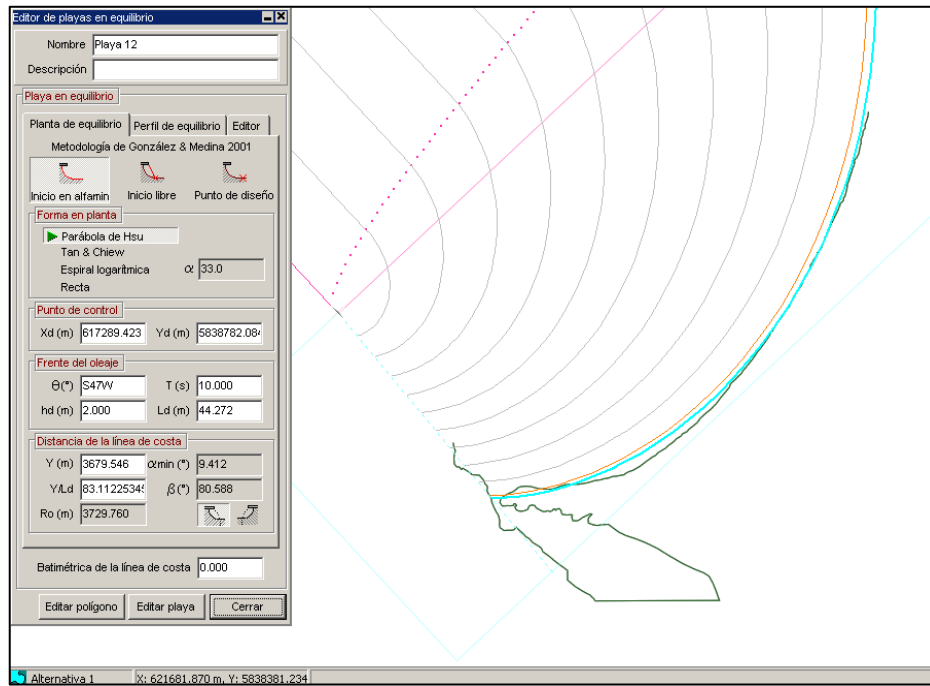
La secuencia de cambios que las líneas litorales presentan un estado de equilibrio en la bahía, debido a que los primeros años de modelación las líneas de costa permanecen con un ajuste aproximado, tomando en cuenta los 9 años de diferencia. Una vez ocurrido en *tsunami* del 27/F la línea litoral presentó un avance a lo largo de toda la playa y un retroceso significativo en Junio de 2011.

En general el modelo parabólico se ajusta de buena manera a la serie histórica de líneas litorales, presentando aproximaciones en la zona sur, media y norte.

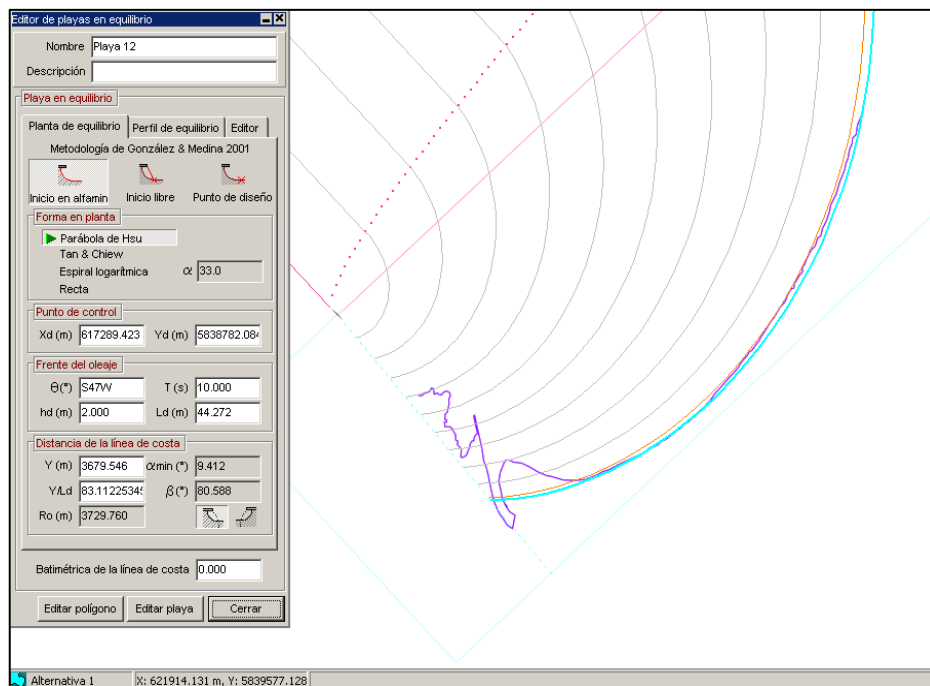


**Figura 8-35: Ajuste Parabólico para año 1984 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.

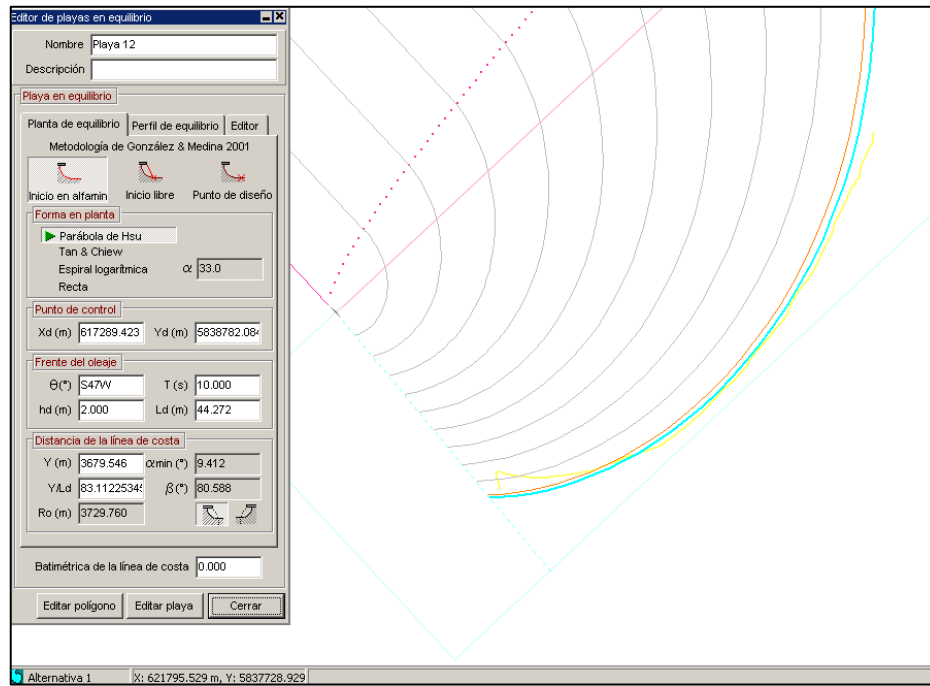
Los cambios inducidos por el *tsunami* en la línea litoral de la bahía de Lebu es una eventualidad de mediano plazo tomando en consideración que un evento energético de tales características es de corto periodo. La evolución depende directamente de la cantidad de energía con la que el evento azotó el lugar, lo que conlleva a los cambios dinámicos de la bahía.



**Figura 8-36: Ajuste Parabólico para año 1993 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.



**Figura 8-37: Ajuste Parabólico para año 2010 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.



**Figura 8-38: Ajuste Parabólico para año 2011 en la bahía de Lebu.**  
Fuente: SMC.

**Tabla 8-17: Cambios en la Línea Litoral de la Bahía de Lebu por Medio de Ajuste Parabólico.**

<b>Distancia [m]</b>	<b>1984</b>	<b>1993</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>
200	-77.9	-109.8	20.4	137.4
400	-41.8	-58.3	-7.1	-40.9
600	-11.4	-25.8	18.6	-13.7
800	-7.5	-7.6	30.8	-9.8
1000	0.2	-2.6	34.6	-17
1200	-6.9	4.9	35.2	-29.8
1400	-19.6	-2.4	24.2	-24.1
1600	-26.5	-11.5	24.6	-52
1800	-37.3	-14.4	18.9	-76
<b>Promedio</b>	<b>-25.4</b>	<b>-25.3</b>	<b>22.2</b>	<b>-14.0</b>

Fuente: Elaboración propia.

### 8.7.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Al realizar los ajustes logarítmicos y parabólicos para las líneas litorales de la bahía de Lebu, se obtuvo que el modelo de Yasso (1965) presenta un mejor ajuste en la zona cóncava que en el medio y norte de la playa. Esto por la linealidad que adquiere la espiral logarítmica en ese tramo de medición. En cambio el modelo parabólico de Hsu (1989) presenta un mayor ajuste a lo largo de toda la bahía.

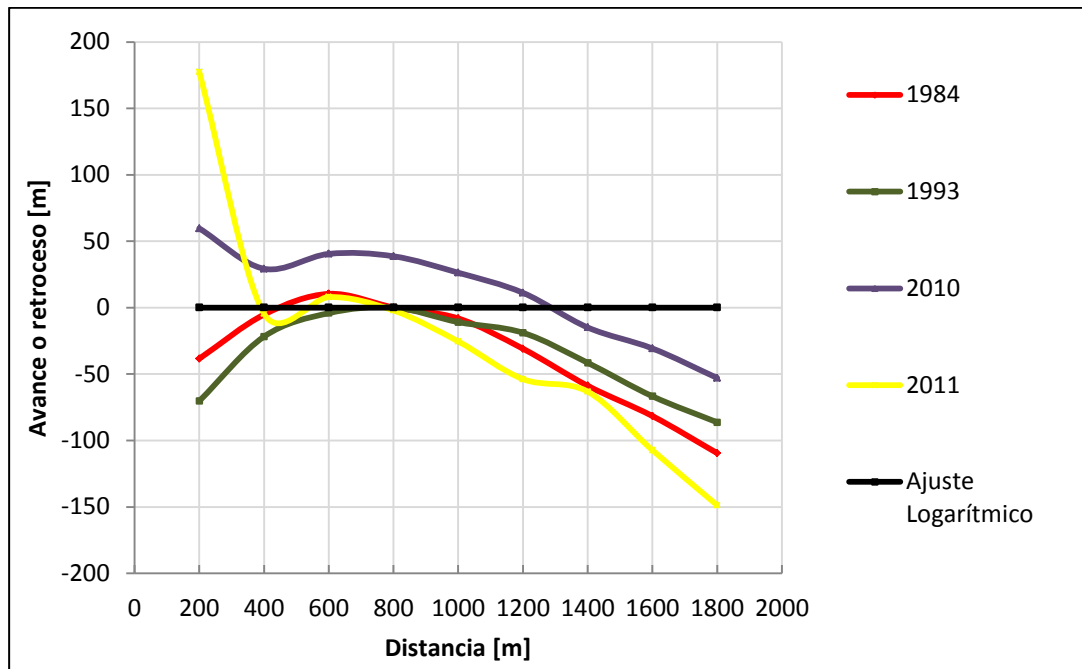
La Figura 8-39 y Figura 8-40 representan los avances y retrocesos de las líneas litorales de la bahía de Lebu con respecto al modelo matemático respectivo. El comienzo de la medición es de los 200 [m] correspondiente a la desembocadura del río Lebu y el término de los 1800 [m] al extremo norte de la playa.

De las figuras se infiere que para el ajuste logarítmico las líneas se ven afectadas al comienzo de la medición por los aportes del río Lebu, presentando avances importantes para la fecha de Marzo de 2010 y Junio de 2011. Para la zona media entre los 400 y 1000 [m] las líneas de los años 1984, 1993 y 2011 presentan una tendencia similar, en cambio, para el año 2010 existe un avance importante de 33.7 [m] promedio. En la zona norte de la playa, el modelo pierde representatividad con las líneas litorales por lo que se desajustan con un retroceso mínimo de 50 [m]. Cabe señalar que la línea litoral para el año 2010 es predominante a lo largo de toda la bahía.

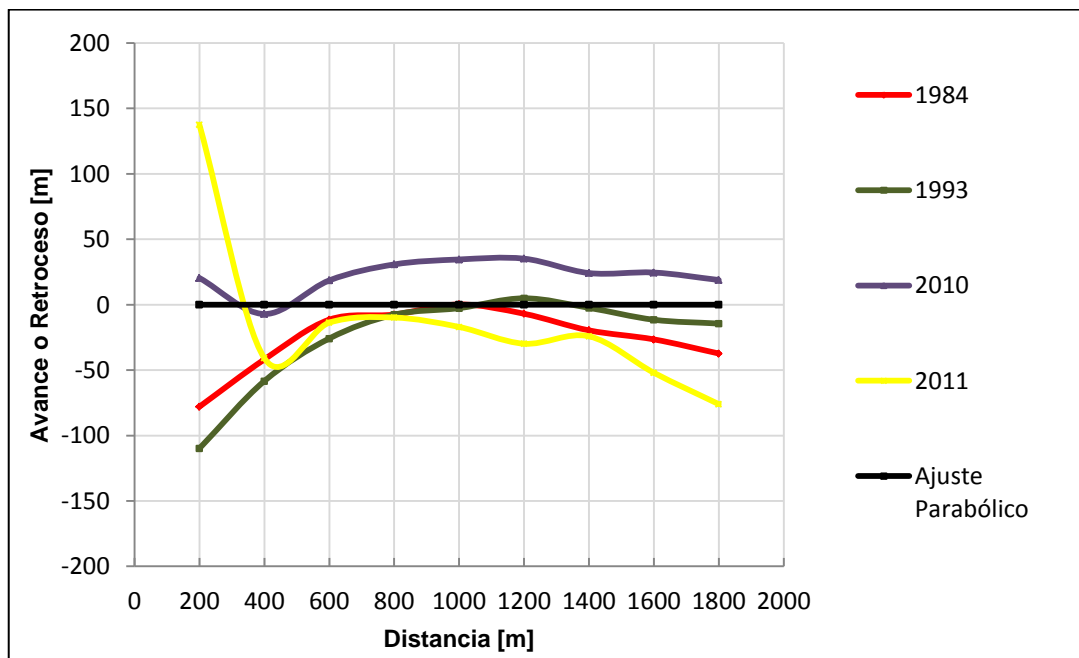
Por otro lado, el modelo parabólico a simple vista se ajusta de mejor manera a la línea negra que es el ajuste matemático. Al igual que el modelo logarítmico, la zona sur se ve predominada por los aportes del río Lebu, más en épocas estivales donde es mayor el transporte de sedimentos por el aumento del caudal. De los 600 a 1800 [m] las líneas litorales presentan un excelente ajuste al modelo parabólico destacando la predominancia de la línea litoral de Marzo de 2010.

De lo anterior se sintetiza que la bahía de Lebu presenta buenos ajustes al modelo parabólico, excepto en la zona sur por efectos de la desembocadura del río. El modelo logarítmico indica una leve tendencia en la parte cóncava de la playa, siendo poco representativo en la zona media y norte.

El avance y retroceso de las líneas litorales se ven modificadas por efectos del *tsunami* del 27/F de 2010 ya que las mediciones de ese año presentan avances a lo largo de toda la playa. Sin embargo aquel aumento en los sedimentos de la bahía adquiere una nueva modificación a corto plazo, presentando condiciones de retroceso y erosión en la playa. Aquel acontecimiento se atribuye a un estado de equilibrio en la planta de la bahía, siendo este estático, ya que la playa al ser alterada por el *tsunami* presentó avances de 98 [m] en la medición de 200 [m], 34[m] a los 1000 [m] y 60 [m] en los 1800 [m] y para Junio de 2011 esos avances retrocedieron 53 [m] a los 1000 [m] y 97[m] a los 1800 [m].



**Figura 8-39: Avance y Retroceso en la Bahía de Lebu en Función al Ajuste Logarítmico.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 8-40: Avance y Retroceso en la Bahía de Lebu en Función al Ajuste Parabólico.**  
 Fuente: Elaboración propia.

## 9. CONCLUSIONES

A continuación se representarán las conclusiones principales del proyecto:

1. Se han determinado los cambios morfodinámicos de la bahía de Lebu por efectos del *Tsunami* del 27 de Febrero de 2010, por medio de modelos matemáticos y estudios de ingeniería conceptual, básica y de detalle.
2. Se han analizado los cambios en planta y en perfil de la bahía de Lebu para diferentes escalas temporales y espaciales, mediante la georreferenciación de fotografías aéreas y procesamiento de las batimetrías en detalle.
3. Se han obtenido las condiciones de oleaje asociadas al flujo medio de energía anual a través del empleo del software STWAVE y la obtención de las funciones de transferencia. Posteriormente, mediante el software Ref-Spec se recalculó los espectros en aguas someras.
4. Se determinó la evolución de la línea litoral utilizando la herramienta SMC y la sección de planta de equilibrio, mediante modelos logarítmicos y parabólicos y de esta forma la obtención de la tendencia de la línea litoral de la bahía de Lebu para una serie temporal de 28 años.
5. Se calculó los avances y retrocesos de la línea litoral mediante los resultados de los modelos matemáticos y se determinó cual es su variación y tendencia a causa de los efectos ocasionados por el *Tsunami* del año 2010.

La determinación de los cambios morfodinámicos y la evolución de la línea litoral se analizaron mediante diversas variables, métodos y parámetros. En primer lugar se efectuó un estudio de las mareas para 2 años, en la zona de playa y en el río Lebu. De ellas se obtuvo un cambio en el nivel medio del mar en el mareógrafo localizado en el mar y en el río del año 2012. Los resultados de los análisis armónicos y no armónicos hacen referencia a un posible arrastre significativo de sedimentos producido por el *tsunami* del 2010, donde se produjo importantes niveles de acreción. Esta condición de equilibrio es inferida por el estado de erosión que la ensenada presenta en relación a la acumulación de sedimentos una vez culminado el evento tectónico.

Los resultados obtenidos mediante los análisis granulométricos de las campañas de terreno que se realizaron, fueron que para los 4 perfiles trazados el grano experimenta diversas evoluciones dependiendo de la época estacional en que se encuentre, destacando la presencia de sedimento grueso en invierno y fino en verano. Cabe resaltar que la clasificación de sedimentos que más ocurrencias contiene en la playa de Lebu para todas las fechas de muestreo, son Arena Mediana y Arena Gruesa. La muestra cercana a la rompiente es el sector donde más variabilidad de sedimentos existe distinguiendo la presencia de Grava Fina. La evolución del grano para el año de estadística sedimentaria es poco variable permaneciendo predominada por Arena principalmente Mediana y Gruesa, viéndose modificada en periodos estivales.

Mediante un análisis del diámetro d50 se determinó que para los periodos de Marzo y Junio del año 2011, existe un mayor diámetro en la rompiente específicamente en el perfil 4. Mayo del 2011 y Febrero del 2012 experimentan un aumento de diámetro en la zona trasera de la playa, cercana al río Lebu.

Posteriormente se determinó el transporte de sedimentos total de la bahía de Lebu, utilizando las 3 batimetrías dispuestas. Los resultados arrojaron que una vez ocurrido el *tsunami* del 27 de Febrero de 2010, la bahía de Lebu presenta condiciones de depositación o acreción en el corto plazo. Ya transcurrido el mediano plazo, la bahía tiende presentar estados de equilibrios, ya que la zona comienza a erosionarse a lo largo de toda la ensenada. El volumen depositado una vez culminado el evento fue de 3.226.928 [m<sup>3</sup>] y el volumen erosionado desde el *tsunami* a la fecha de Marzo de 2012 fue de 1.236.171 [m<sup>3</sup>]. Lo anterior deja en evidencia una clara condición de playa en equilibrio que ha tendido a posicionar su morfología a un estado original.

Se determinaron los cambios morfodinámicos en los perfiles de la bahía, procesando la información de la batimetría en detalle. Se compararon y los resultados presentan una disminución en el fondo para el año 2011, demostrando una condición de acreción en la zona. Posteriormente los perfiles trazados en el año 2012, presentan un aumento en el fondo, y de esta forma exhibir una condición de erosión. Esto se corrobora con el transporte total de sedimentos y su estado de perfil de equilibrio.

Los cambios en planta de la bahía y de la línea litoral se realizaron mediante la georreferenciación de imágenes satelitales y de los datos obtenidos en terreno sobre las líneas de costa. Los resultados de aquello, expresa un aumento significativo de la línea litoral para Marzo del año 2010, a causa de los efectos de arrastre de sedimento del *tsunami*. Para el año 2011, la línea de costa retrocedió, ratificando el estado de erosión en la bahía. En la zona de desembocadura del río, la flecha litoral presenta un avance importante una vez ocurrido el evento.

Las condiciones de oleaje en la bahía de Lebu se vieron afectadas por el *tsunami* del 2010, ya que al comparar los parámetros de resumen para los 2 casos en estudio, se comprobó que después de evento, las alturas de ola significativas presentaron un aumento de 12,76% entre las alturas de 1.5, 2 y 3 [m]. Los periodos con mayor frecuencia se encuentran en el rango de 8 a 10 [s], presentando un leve aumento de estos una vez ocurrido el evento oceánico. Las direcciones propagadas al punto de monitoreo, presentan una orientación de 292.5 y 337.5 [°], dejando estipulado que el tsunami no cambia trascendentalmente las condiciones de orientación a la profundidad de 10 [m].

La evolución de la línea litoral se verificó utilizando modelos matemáticos, específicamente espirales logarítmicas y parabólicas. Sus consideraciones dependen netamente de las variables anteriormente anunciadas y de la geometría de la bahía.

Al realizar los ajustes logarítmicos y parabólicos para las líneas litorales de la bahía de Lebu, se obtuvo que el modelo de Yasso (1965) presenta un adecuado ajuste en la zona cóncava que en el medio y norte de la playa. Esto por la linealidad que adquiere la espiral logarítmica en ese tramo de medición. En cambio el modelo parabólico de Hsu (1989) presenta un mayor ajuste a lo largo de toda la bahía.

De ellas se obtuvieron que el modelo parabólico se ajustó de mejor manera que el modelo logarítmico presentando un promedio de 10,4 [m] menos de retroceso para el año 1984. En 1993 la espiral parabólica se ajusta en promedio 10,3 [m] menos de retroceso. En el año 2010 presenta un aumento de 10,3 [m] en el avance de la línea litoral. Finalmente para el año 2011, disminuye 10,4 [m] con respecto al retroceso de la espiral logarítmica.

De esta forma se estima que la línea litoral de la bahía de Lebu presentó un avance de 22 [m] promedio a lo largo de la playa para Marzo del año 2010, según la metodología de la espiral parabólica. Este avance en el mediano plazo ha ido en retroceso presentando -14 [m] de línea de litoral.

De lo anterior, se confirma y corrobora que los cambios producidos en las mareas, granulometría, transporte de sedimentos, cambios morfodinámicos tanto en planta como el perfil, trascienden en un avance y acreción una vez producido el *tsunami*. Los cambios en el mediano plazo presentan términos de erosión, es decir, vuelven a su estado original.

Cabe señalar que el agente no selectivo, es decir, el *tsunami* del 27/F del año 2010 fue un evento de corto plazo que implica modificaciones en el mediano plazo en la bahía de Lebu y en su línea litoral. Esta evolución en la costa se debe más a la energía del fenómeno que a la duración total del mismo.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- © Unesco. (18 de Julio de 2012). © Unesco. Obtenido de <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/ZZ/GP0725.GIF>
- © Unesco. (18 de Julio de 2012). © Unesco. Obtenido de <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/ZZ/GP1118.GIF>
- Araya-Vergara, J. F. (1985). Base geomorfológicas para una división de las costas de Chile. Santiago: Depto. de Geografía de U.de Chile.
- Benedet, L., Klein, A., & Hsu, J. (2004). Practical Insights and Applicability of Empirical. En *Proc. 29th Coastal Eng. Conf.* World Scientific.
- Berkhoff. (1972). Proyectos y Construcción de Playas Artificiales y Regeneración de Playas. En G. d. GIOC, *Modelos Hidrodinámicos y de Transporte de Sedimentos* (pág. 106). Santander: Dpto. de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente.
- Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd.
- Carter. (1988). En C. Woodroffe, *Coast; Form, process and evolution* (pág. 2). Cambridge.
- Cienfuegos, R. (18 de Febrero de 2011). *Diario La Tercera*. Recuperado el 19 de Marzo de 2012, de <http://diario.latercera.com/2011/02/18/01/contenido/tendencias/16-59661-9-revelan-imagenes-de-recuperacion-de-la-ribera-del-rio-mataquito.shtml>
- Coastal Engineering Manual. (2002). Water Wave Mechanics. En A. C. Engineers, *Engineer Manual 1110-2-1100, Part II* (págs. II-1-93). Washington DC, U.S.
- Comisión Regional de Uso del Borde Costero. (2006). Memoria Explicativa, Zonificación Borde Costero Región del Bío Bío.
- Courtier. (1992). En SHOA, *Glosario de Mareas y Corrientes* (2° ed., pág. 11). Valparaíso, Chile.
- Diaz-Naveas, J., & Frutos, J. (2010). Geología Marina de Chile. En *Comité Oceanográfico Nacional de Chile* (pág. 80). Valparaíso: Capítulo 9 Geomorfología costera.
- (2002). Water Wave Mechanics. En A. C. Engineers, *Engineer Manual 1110-2-1100, Part II*.
- Fredsoe, J., & Deigaard, R. (1994). *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. Word Scientific.
- G. Dean , R., & A. Dalrymple, R. (1991). *Water Wave Mechanics For Engineers and scientists*. Singapore: World Scientists.
- G.I.O.C. (2001). Documento de Referencia. En U. d. Cantabria, *Procesos litorales* (Vol. 2, pág. 15).

- G.I.O.C. (2000). Documento de Referencia. En U. d. Cantabria, *Regeneración de Playas* (pág. All.29).
- G.I.O.C. (2001). Documento de Referencia. En U. d. Cantabria, *Dinámicas* (Vol. 1, pág. 46).
- G.I.O.C. (2001). Documento de Referencia. En U. d. Cantabria, *Procesos Litorales* (Vol. 2, pág. 171).
- García, S. (2003). *Predicción de los cambios en el perfil de playa mediante parámetros simples*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Lorca, E. (2010). *Terremotos y tsunamis o maremotos*.
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad en Chile. En *Física de la Tierra* (pág. nº 10: 222).
- Marine Wholesales. (2009). *Marine electronics*. Recuperado el 6 de Mayo de 2012, de <http://www.marinewholesales.com/en/product.php?id=2313&gclid=CNyyh9iK568CFZF R7AodzBTL3g>
- Martínez Reyes, C. (2009). *Geomorfología Dinámica del sistema costero de la Bahía de Concón. Tesis Doctoral*. España: Universidad de Barcelona (Inédito).
- Martínez, C., Jaque, E., Quezada, M., Quezada, J., & Fernández, A. (2009). Aplicaciones de Modelo de Ajuste para el Análisis de los Cambios Históricos de la Línea Litoral en Grandes Ensenadas. Ejemplos en Chile. En J. Alcántara-Carrió, I. Correa, F. Isla, M. Alvarado, A. Klein, J. Cabrera, y otros, *Métodos en teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral* (págs. 139-163). España: Programa de Ciencia y Tecnología para el desarrollo.
- Martínez, C., Quezada, M., & Rubio, P. (2011). Historical changes in the shoreline and littoral processes on a headland bay beach in central Chile. En *Geomorphology* (págs. 135: 80–96).
- Medina, R., Vidal, C., González, M., Bernabeu, A., & Galofré, J. (2001). *Modelado de la morfodinámica de playas por medio de formulaciones de «Equilibrio»*. *Física de la Tierra*, 13: 95-117.
- Miche. (1951). Wave Breaking on an Opposing Current. En J. McKee Smith, *Coastal Engineering Technical* (págs. Note IV-17-2).
- Nicolau del Roure, F. (2004). *Evaluación de metodologías de transferencia de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras*. Universidad de Chile.
- Pawlowicz, R. (Marzo de 2011). T\_Tide Harmonic Analysis Toolbox.
- Plan Regulador Comunal. (2003). *Estudio Áreas de Riego y Protección*. Lebu.

- Raabe, A., Klein, A., González, M., & Medina, R. (2009). MEPBAY and SMC: Software tools to support different operational levels of headland-bay beach in coastal engineering projects. En *Coastal Engineering* (págs. 57: 213–226).
- RAE. (2001). *Real Academia Española*. Recuperado el 27 de Octubre de 2011, de [http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO\\_BUS=3&LEMA=morfo](http://buscon.rae.es/draeI/SrvltConsulta?TIPO_BUS=3&LEMA=morfo)
- Rijn, L. (1990). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Netherlands: University of Utrecht.
- Schiaffino, C., Brignone, M., & Ferrari, M. (2012). Application of the parabolic bay shape equation to sand and gravel beaches on Mediterranean coasts: Reply to the comments of D.E. Reeve. En *Coastal Engineering* (págs. 65: 11-15).
- SHOA. (2010). *Tsunami, las grandes olas*.
- Short, A. (1999). *Beach and Shoreface Morphodynamics*. John Wiley & Sons, LTD.
- Udden, & Wentworth. (1922). En S. Blott, *Gradistat: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments* (pág. 1239).
- Vergara, H. (1991). *Manual de Laboratorio para Sedimentología*.
- Woodroffe, C. (2003). *Coast; form, process and evolution*. Cambridge: University Press.
- Wright, & Thom. (1977). En C. Martínez, *Geomorfología Dinámica del sistema costero de la Bahía de Concón (Chile Central)* (pág. 13).
- Yasso, W. (1965). Plan geometry of hedland-bay beaches. En *Journal of Geology* (págs. 73: 702-714.).

## 11. ANEXOS

# 11.1 ANEXO ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

## 11.1.1 ANÁLISIS TRANSVERSAL

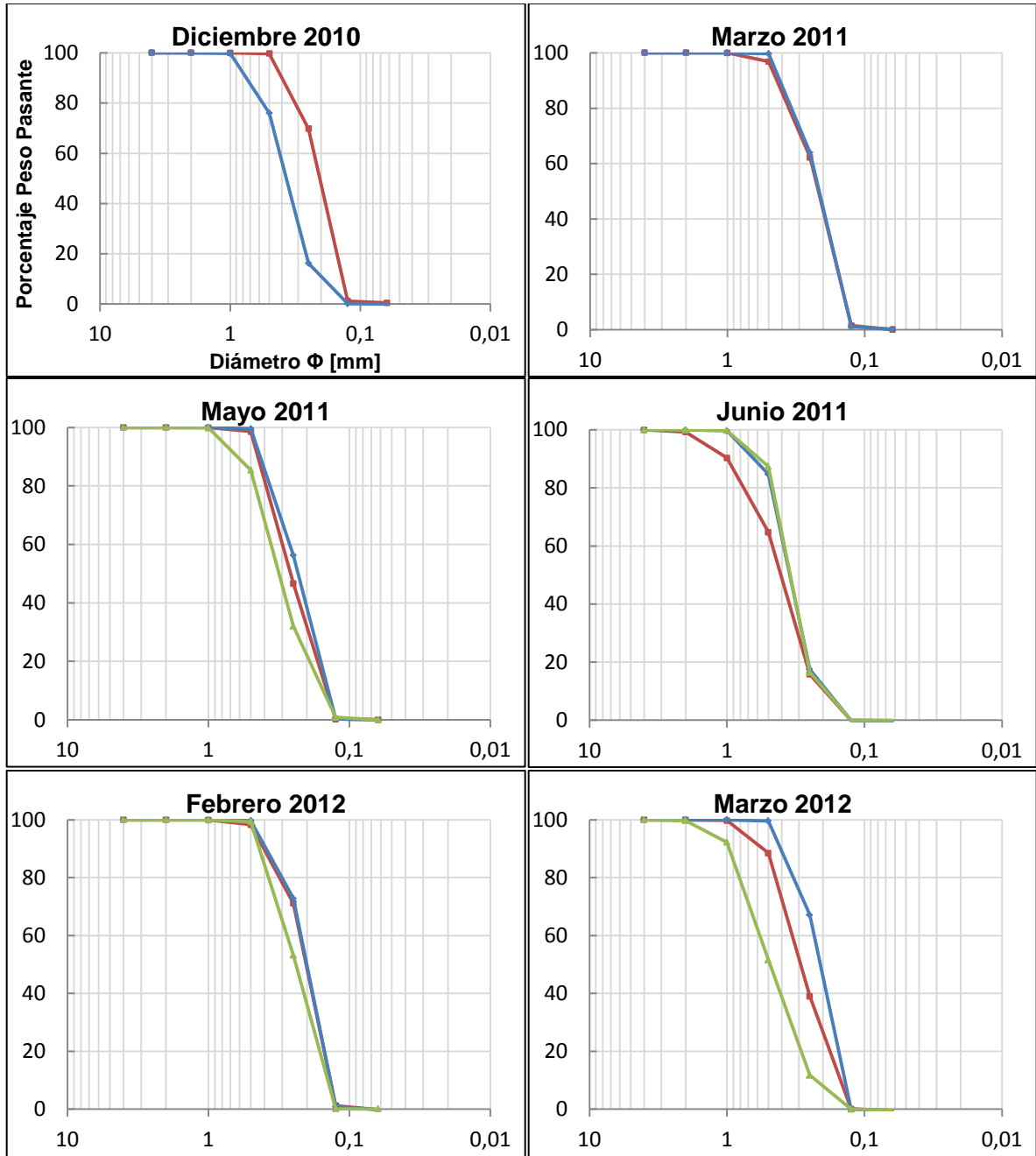
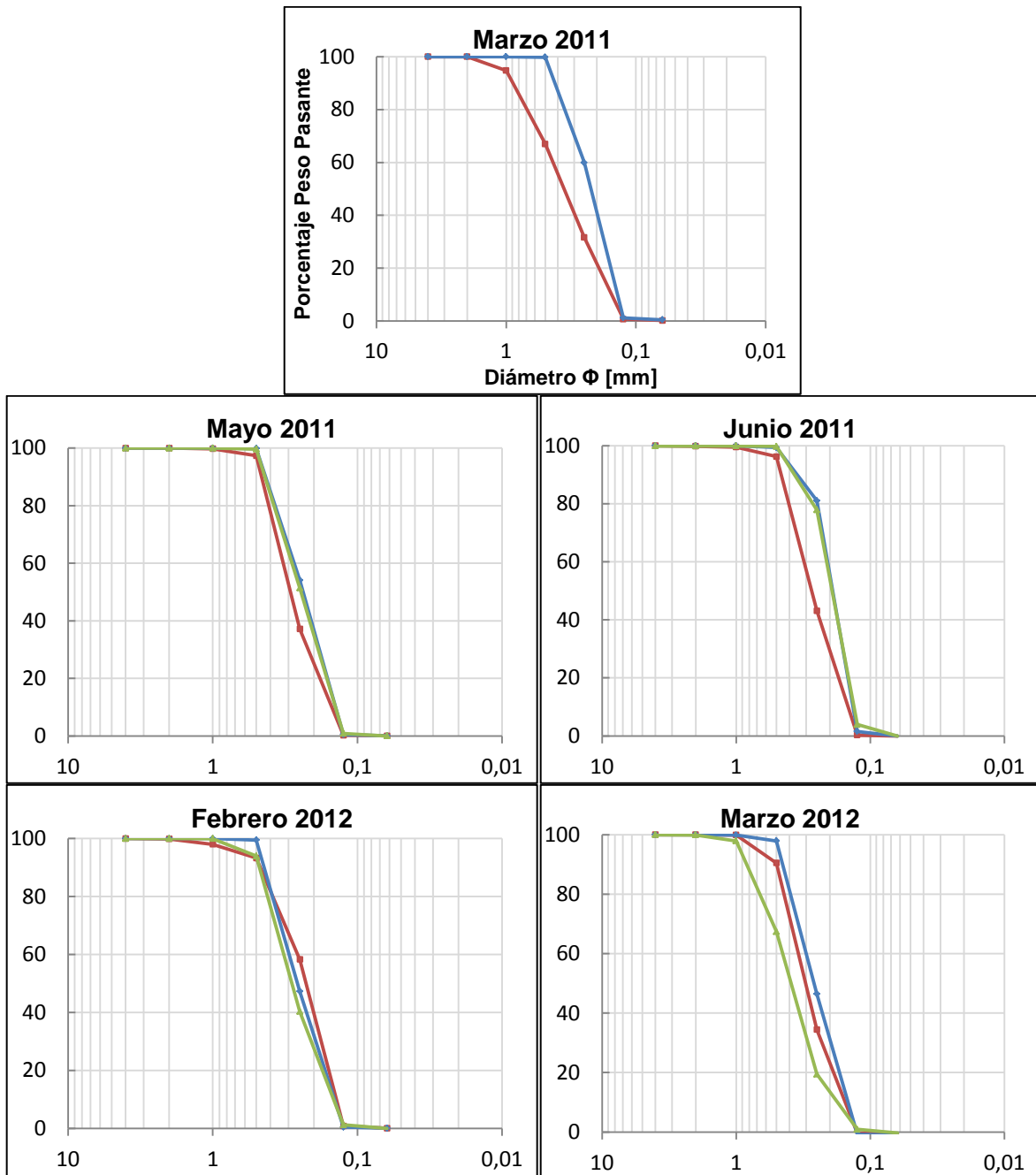


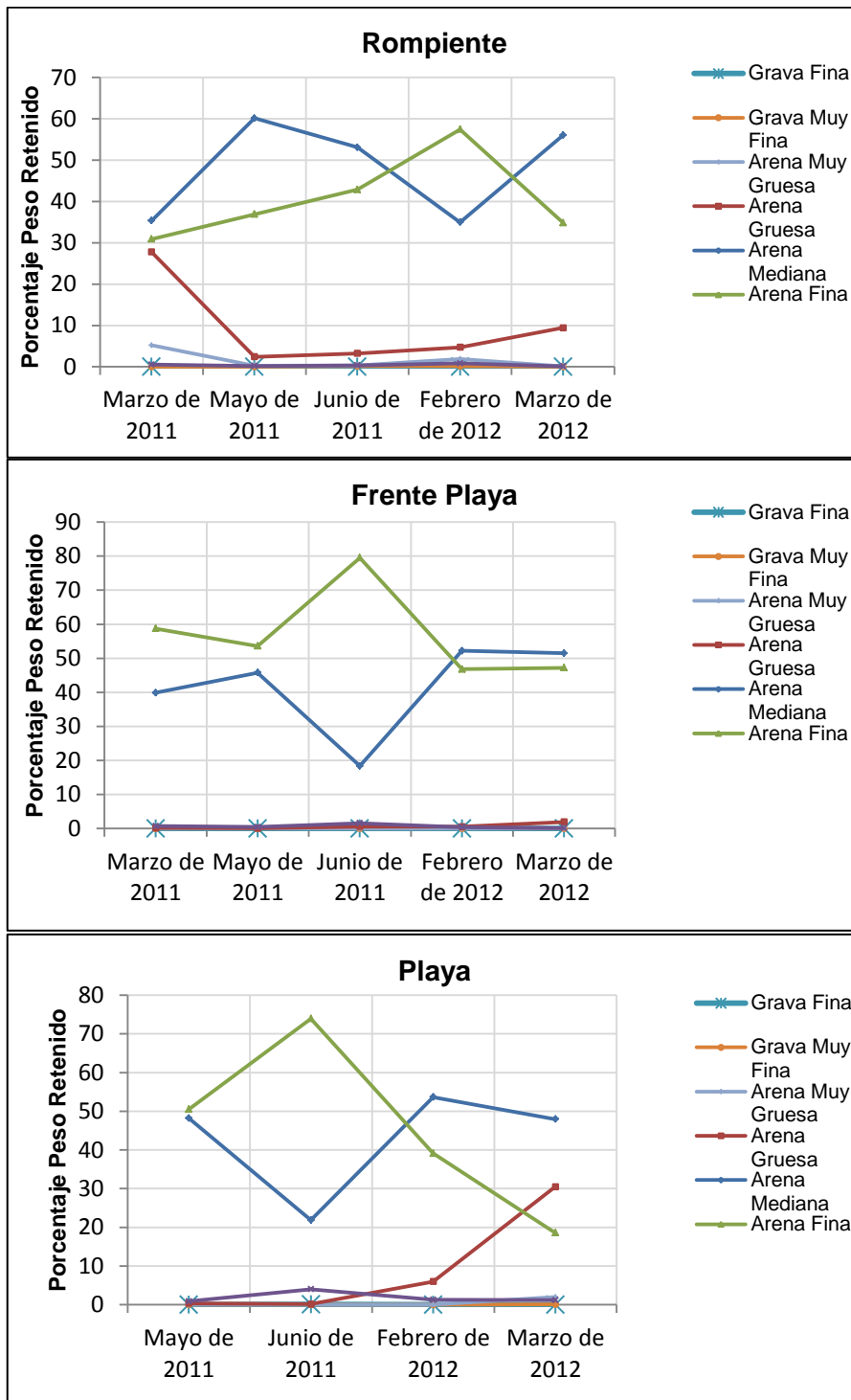
Figura 11-1: Curvas Granulométricas Perfil 1.

Fuente: Elaboración propia.

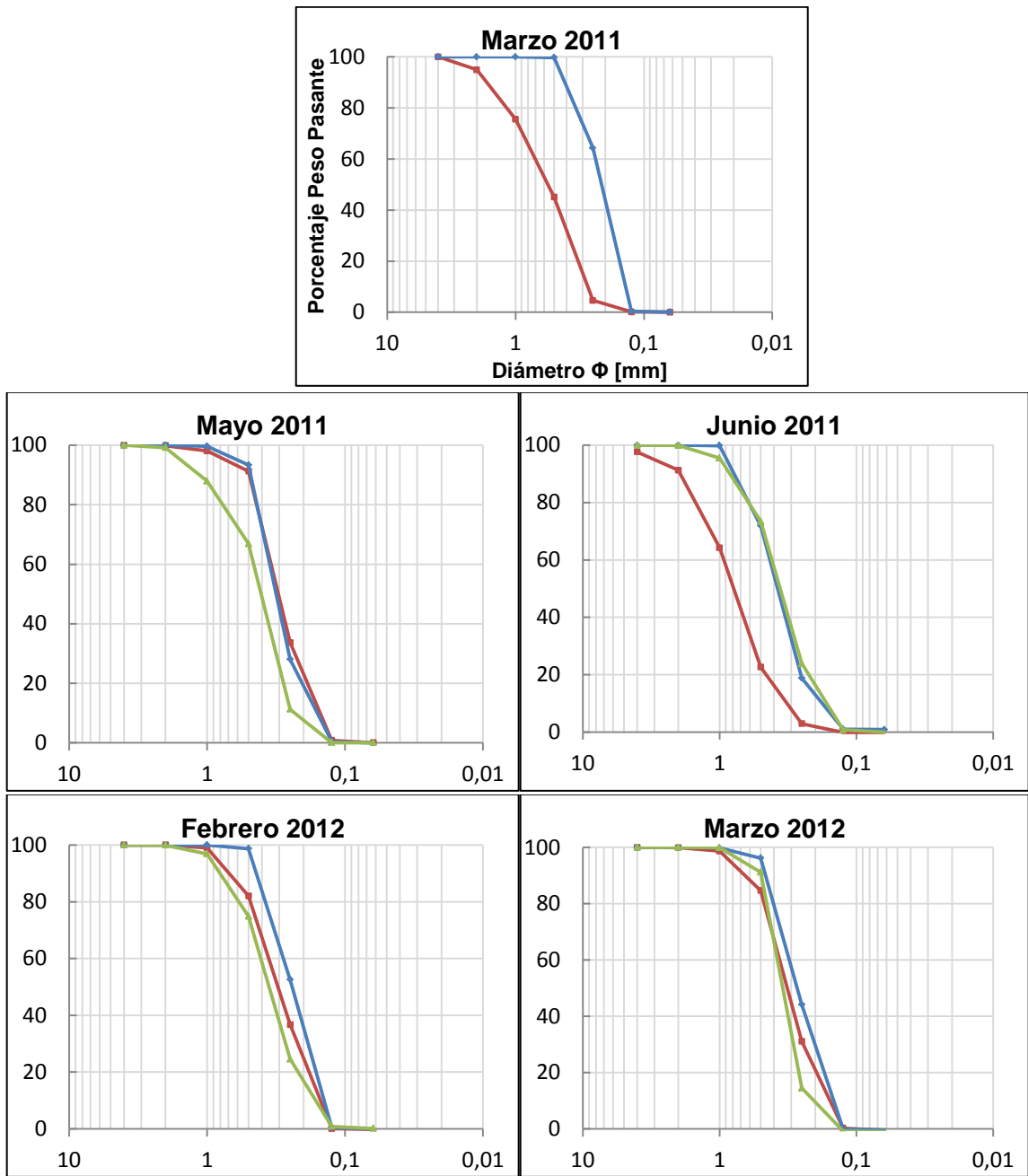


**Figura 11-2: Curvas Granulométricas Perfil 2.**

Fuente: Elaboración propia.

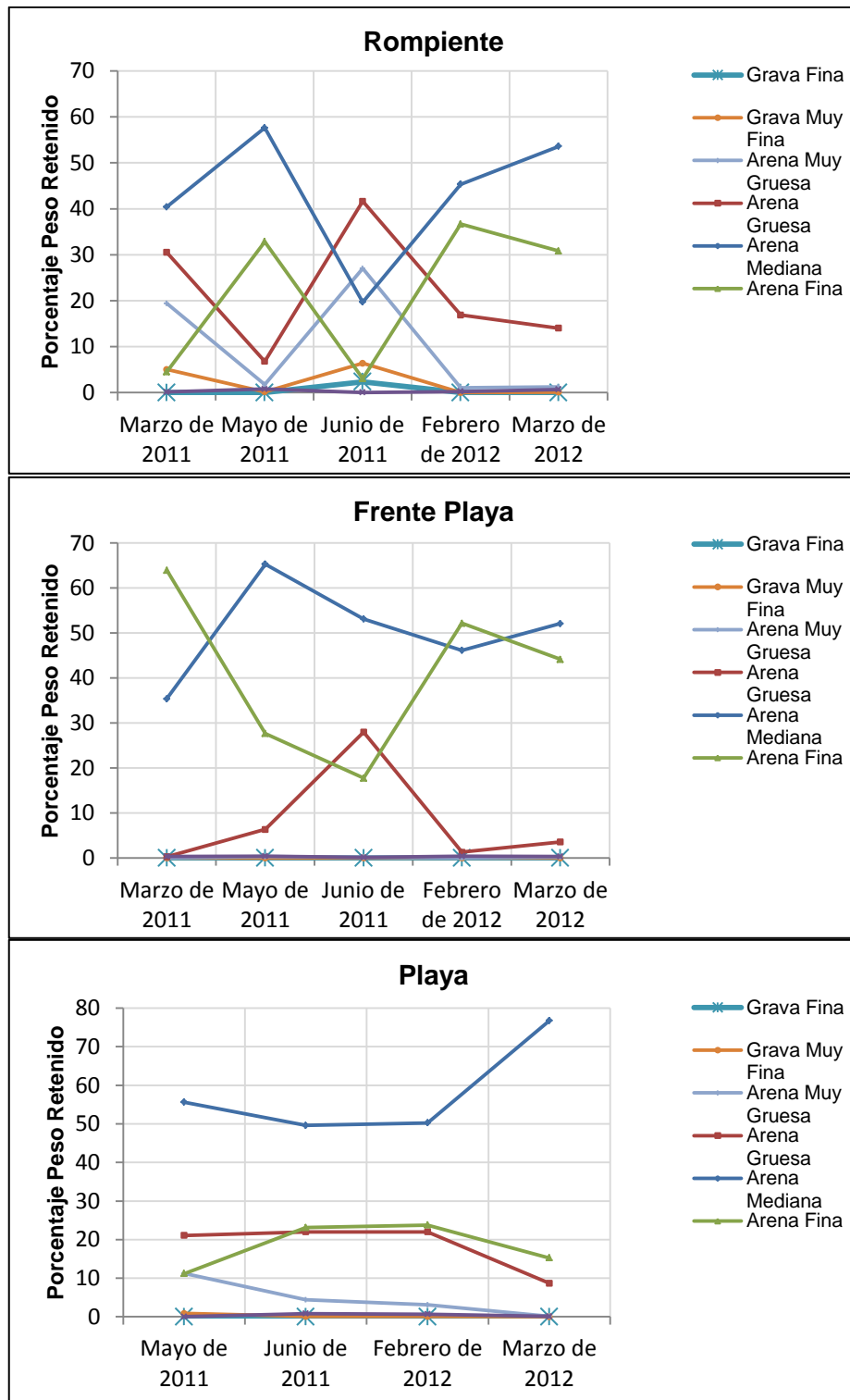


**Figura 11-3: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 2.**  
Fuente: Elaboración propia.



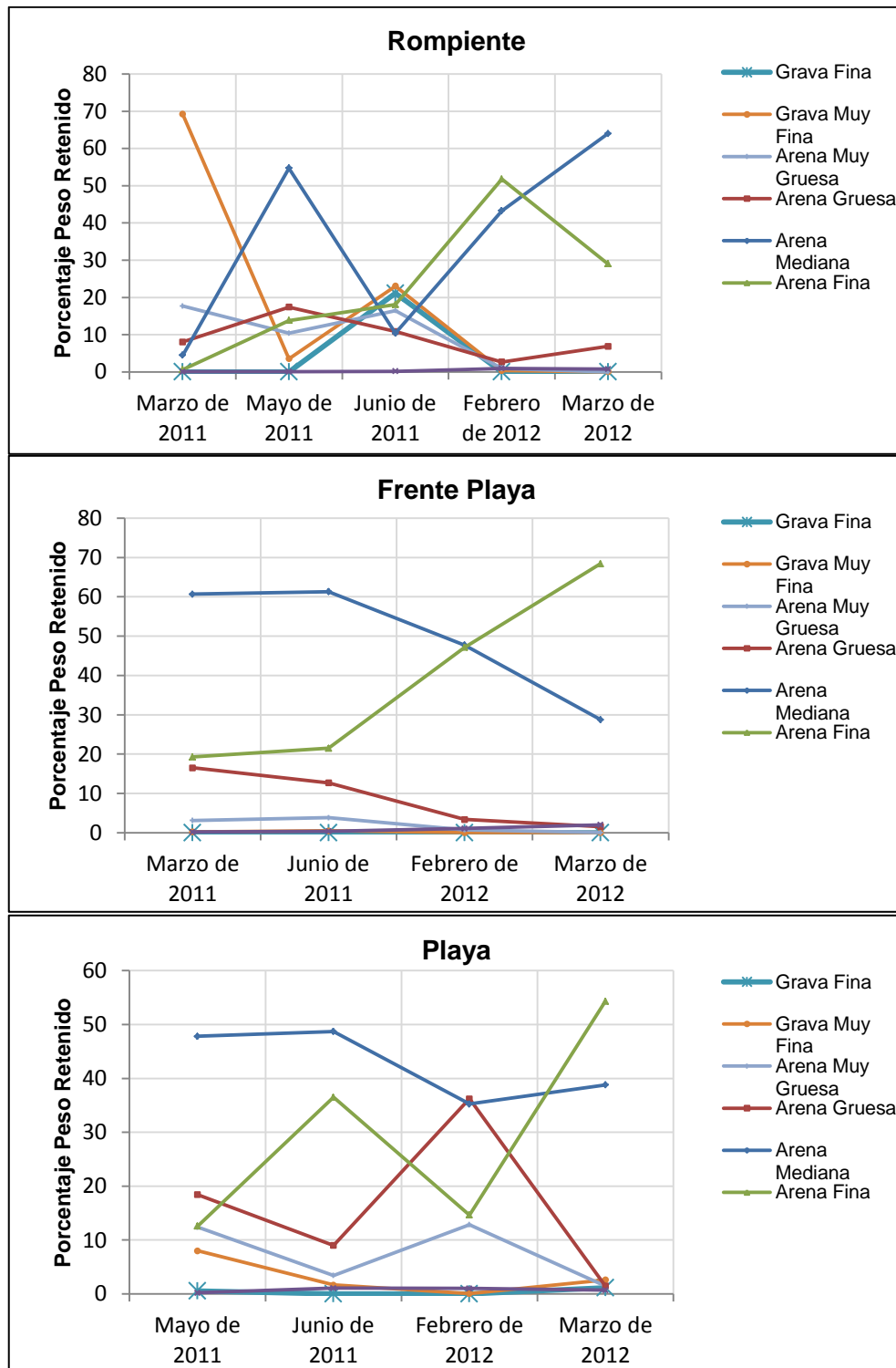
**Figura 11-4: Curvas Granulométricas Perfil 3.**

Fuente: Elaboración propia

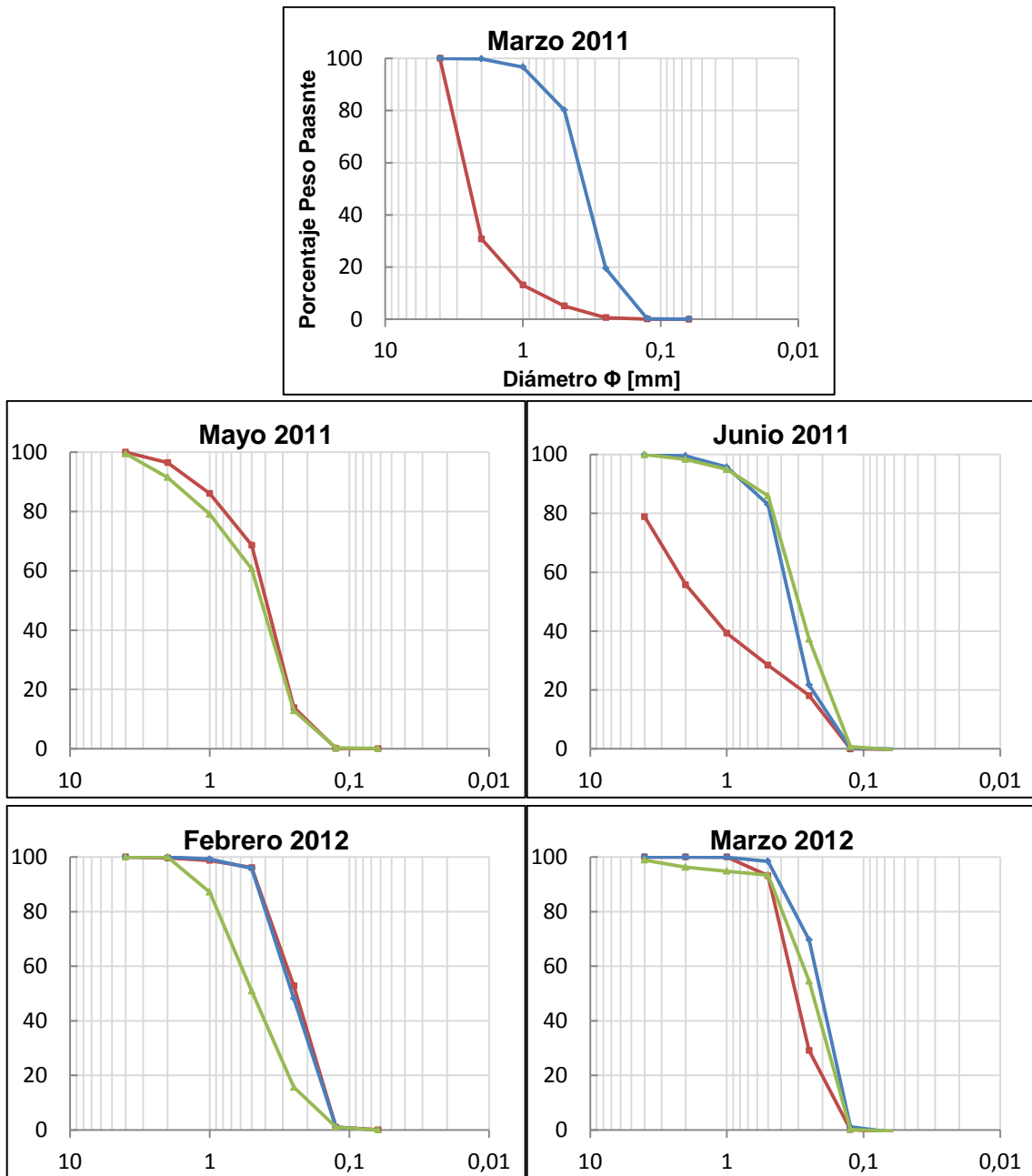


**Figura 11-5: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 3.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-6: Evolución Temporal de Sedimentos, Perfil 4**  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-7: Curvas Granulométricas Perfil 4.**

Fuente: Elaboración propia.

## 11.2 ANEXO ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS SEDIMENTOS

**Tabla 11-1: Indicadores Estadísticos, Perfil 1.**

Fuente: Elaboración propia.

	<b>Curtosis</b>	<b>Asimetría</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Playa</b>			
Mayo 2011	Leptocúrtica	Moderado exceso de finos	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Muy Leptocúrtica	Moderado exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Error	Alto exceso de gruesos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Mesocúrtica	Moderado exceso de gruesos	Clasificación Moderada
<b>Frente Playa</b>			
Marzo 2011	Platicúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Mayo 2011	Platicúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Muy Leptocúrtica	Moderado exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Error	Alto exceso de gruesos	Bien Clasificada
Marzo 2012	Error	Alto exceso de gruesos	Bien Clasificada
<b>Rompiente</b>			
Marzo 2011	Platicúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Mayo 2011	Platicúrtica	Moderado exceso de finos	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Bien Clasificada
Febrero 2012	Error	Alto exceso de gruesos	Bien Clasificada
Marzo 2012	Platicúrtica	Moderado exceso de finos	Clasificación Moderada

**Tabla 11-2: Indicadores Estadísticos, Perfil 2.**

Fuente: Elaboración propia.

	<b>Curtosis</b>	<b>Asimetría</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Playa</b>			
Mayo 2011	Error	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Muy Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Platicúrtica	Moderado exceso de finos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Mesocúrtica	Simétrica	Clasificación Moderada
<b>Frente Playa</b>			
Marzo 2011	Platicúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Mayo 2011	Platicúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Muy Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Error	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Error	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
<b>Rompiente</b>			
Marzo 2011	Platicúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Mayo 2011	Error	Simétrica	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Error	Moderado exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Platicúrtica	Alto exceso de gruesos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Platicúrtica	Moderado exceso de finos	Clasificación Moderada

**Tabla 11-3: Indicadores Estadísticos, Perfil 3.**

Fuente: Elaboración propia.

	<b>Curtosis</b>	<b>Asimetría</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Playa</b>			
Mayo 2011	Muy Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Bien Clasificada
Junio 2011	Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Mesocúrtica	Simétrica	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Muy Leptocúrtica	Simétrica	Bien Clasificada
<b>Frente Playa</b>			
Marzo 2011	Platicúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Mayo 2011	Mesocúrtica	Simétrica	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Mesocúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Error	Alto exceso de gruesos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Error	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
<b>Rompiente</b>			
Marzo 2011	Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
Mayo 2011	Error	Moderado exceso de gruesos	Muy bien Clasificada
Junio 2011	Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
Febrero 2012	Platicúrtica	Simétrica	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Mesocúrtica	Moderado exceso de finos	Clasificación Moderada

**Tabla 11-4: Indicadores Estadísticos, Perfil 4.**

Fuente: Elaboración propia.

	<b>Curtosis</b>	<b>Asimetría</b>	<b>Desviación Estándar</b>
<b>Playa</b>			
Mayo 2011	Muy Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
Junio 2011	Muy Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Mesocúrtica	Moderado exceso de gruesos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Mesocúrtica	Moderado exceso de finos	Clasificación Moderada
<b>Frente Playa</b>			
Marzo 2011	Muy Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Mayo 2011	-	-	-
Junio 2011	Muy Leptocúrtica	Moderado exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Error	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Error	Alto exceso de finos	Clasificación Moderada
<b>Rompiente</b>			
Marzo 2011	Platicúrtica	Moderado exceso de gruesos	Poco Clasificada
Mayo 2011	Muy Leptocúrtica	Alto exceso de finos	Bien Clasificada
Junio 2011	Error	Alto exceso de finos	Muy bien Clasificada
Febrero 2012	Error	Alto exceso de gruesos	Clasificación Moderada
Marzo 2012	Leptocúrtica	Moderado exceso de gruesos	Poco Clasificada

## 11.3 ANEXO OLAS

**Tabla 11-5: Funciones de Transferencia caso Pre-Tsunami.**

Fuente: Elaboración propia.

MWD Offshore [°]	Tp [s]	H [m]	MWD Stwave [°]	Dirección Meteorológica [°]	Cambio de Dirección
202,5	6	0,21	354	276	73,5
202,5	8	0,30	344	286	83,5
202,5	10	0,38	339	291	88,5
202,5	12	0,40	337	293	90,5
202,5	14	0,38	336	294	91,5
202,5	16	0,37	335	295	92,5
202,5	18	0,37	334	296	93,5
202,5	20	0,37	333	297	94,5
202,5	22	0,38	332	298	95,5
202,5	24	0,40	331	299	96,5
225	6	0,34	352	278	53
225	8	0,42	343	287	62
225	10	0,47	338	292	67
225	12	0,47	336	294	69
225	14	0,45	335	295	70
225	16	0,43	333	297	72
225	18	0,43	333	297	72
225	20	0,43	331	299	74
225	22	0,42	331	299	74
225	24	0,41	330	300	75
247,5	6	0,51	346	284	36,5
247,5	8	0,54	339	291	43,5
247,5	10	0,53	335	295	47,5
247,5	12	0,51	333	297	49,5
247,5	14	0,49	330	300	52,5
247,5	16	0,48	329	301	53,5
247,5	18	0,48	328	302	54,5
247,5	20	0,47	327	303	55,5
247,5	22	0,47	327	303	55,5
247,5	24	0,47	326	304	56,5
270	6	0,66	338	292	22
270	8	0,64	333	297	27
270	10	0,60	329	301	31
270	12	0,54	329	301	31

270	14	0,50	328	302	32
270	16	0,48	327	303	33
270	18	0,47	326	304	34
270	20	0,47	325	305	35
270	22	0,48	325	305	35
270	24	0,49	324	306	36
292,5	6	0,77	326	304	11,5
292,5	8	0,73	323	307	14,5
292,5	10	0,69	321	309	16,5
292,5	12	0,64	322	308	15,5
292,5	14	0,60	322	308	15,5
292,5	16	0,58	322	308	15,5
292,5	18	0,57	322	308	15,5
292,5	20	0,57	322	308	15,5
292,5	22	0,58	322	308	15,5
292,5	24	0,59	322	308	15,5
315	6	0,84	311	319	4
315	8	0,82	311	319	4
315	10	0,80	311	319	4
315	12	0,82	313	317	2
315	14	0,82	315	315	0
315	16	0,79	316	314	-1
315	18	0,76	317	313	-2
315	20	0,71	318	312	-3
315	22	0,70	318	312	-3
315	24	0,66	319	311	-4
337,5	6	0,83	298	332	-5,5
337,5	8	0,82	300	330	-7,5
337,5	10	0,82	303	327	-10,5
337,5	12	0,89	305	325	-12,5
337,5	14	0,93	308	322	-15,5
337,5	16	0,94	310	320	-17,5
337,5	18	0,93	311	319	-18,5
337,5	20	0,86	314	316	-21,5
337,5	22	0,83	313	317	-20,5
337,5	24	0,71	315	315	-22,5

**Tabla 11-6: Funciones de Transferencia caso Post-Tsunami.**

Fuente: Elaboración propia.

MWD Offshore [°]	Ts [s]	H [m]	MWD Stwave [°]	Dirección Meteorológica [°]	Cambio Dirección
202,5	6	0,16	355	275	72,5
202,5	8	0,23	345	285	82,5
202,5	10	0,29	339	291	88,5
202,5	12	0,31	336	294	91,5
202,5	14	0,36	334	296	93,5
202,5	16	0,42	333	297	94,5
202,5	18	0,46	332	298	95,5
202,5	20	0,53	331	299	96,5
202,5	22	0,54	331	299	96,5
202,5	24	0,59	330	300	97,5
225	6	0,30	352	278	53
225	8	0,37	343	287	62
225	10	0,43	338	292	67
225	12	0,48	336	294	69
225	14	0,53	334	296	71
225	16	0,57	332	298	73
225	18	0,59	332	298	73
225	20	0,62	331	299	74
225	22	0,62	331	299	74
225	24	0,64	330	300	75
247,5	6	0,50	345	285	37,5
247,5	8	0,53	338	292	44,5
247,5	10	0,56	334	296	48,5
247,5	12	0,59	332	298	50,5
247,5	14	0,63	330	300	52,5
247,5	16	0,66	329	301	53,5
247,5	18	0,69	328	302	54,5
247,5	20	0,72	327	303	55,5
247,5	22	0,73	327	303	55,5
247,5	24	0,77	326	304	56,5
270	6	0,67	337	293	23
270	8	0,68	332	298	28
270	10	0,69	329	301	31
270	12	0,69	328	302	32
270	14	0,69	327	303	33
270	16	0,69	326	304	34

270	18	0,69	325	305	35
270	20	0,70	325	305	35
270	22	0,71	324	306	36
270	24	0,75	324	306	36
292,5	6	0,78	327	303	10,5
292,5	8	0,78	324	306	13,5
292,5	10	0,77	322	308	15,5
292,5	12	0,81	322	308	15,5
292,5	14	0,85	321	309	16,5
292,5	16	0,88	321	309	16,5
292,5	18	0,90	321	309	16,5
292,5	20	0,94	320	310	17,5
292,5	22	0,95	320	310	17,5
292,5	24	0,99	320	310	17,5
315	6	0,85	312	318	3
315	8	0,86	310	320	5
315	10	0,86	310	320	5
315	12	0,88	311	319	4
315	14	0,87	313	317	2
315	16	0,85	315	315	0
315	18	0,84	316	314	-1
315	20	0,81	317	313	-2
315	22	0,81	317	313	-2
315	24	0,80	318	312	-3
337,5	6	0,82	298	332	-5,5
337,5	8	0,84	300	330	-7,5
337,5	10	0,86	302	328	-9,5
337,5	12	0,93	302	328	-9,5
337,5	14	0,93	304	326	-11,5
337,5	16	0,90	307	323	-14,5
337,5	18	0,87	308	322	-15,5
337,5	20	0,81	311	319	-18,5
337,5	22	0,80	311	319	-18,5
337,5	24	0,71	314	316	-21,5

## 11.4 ANEXO CLIMA DE OLEAJE OPERACIONAL

### 11.4.1 PRE-TSUNAMI

**Tabla 11-7: Tabla de incidencia de Hmo y Tp, caso Pre-Tsunami.**

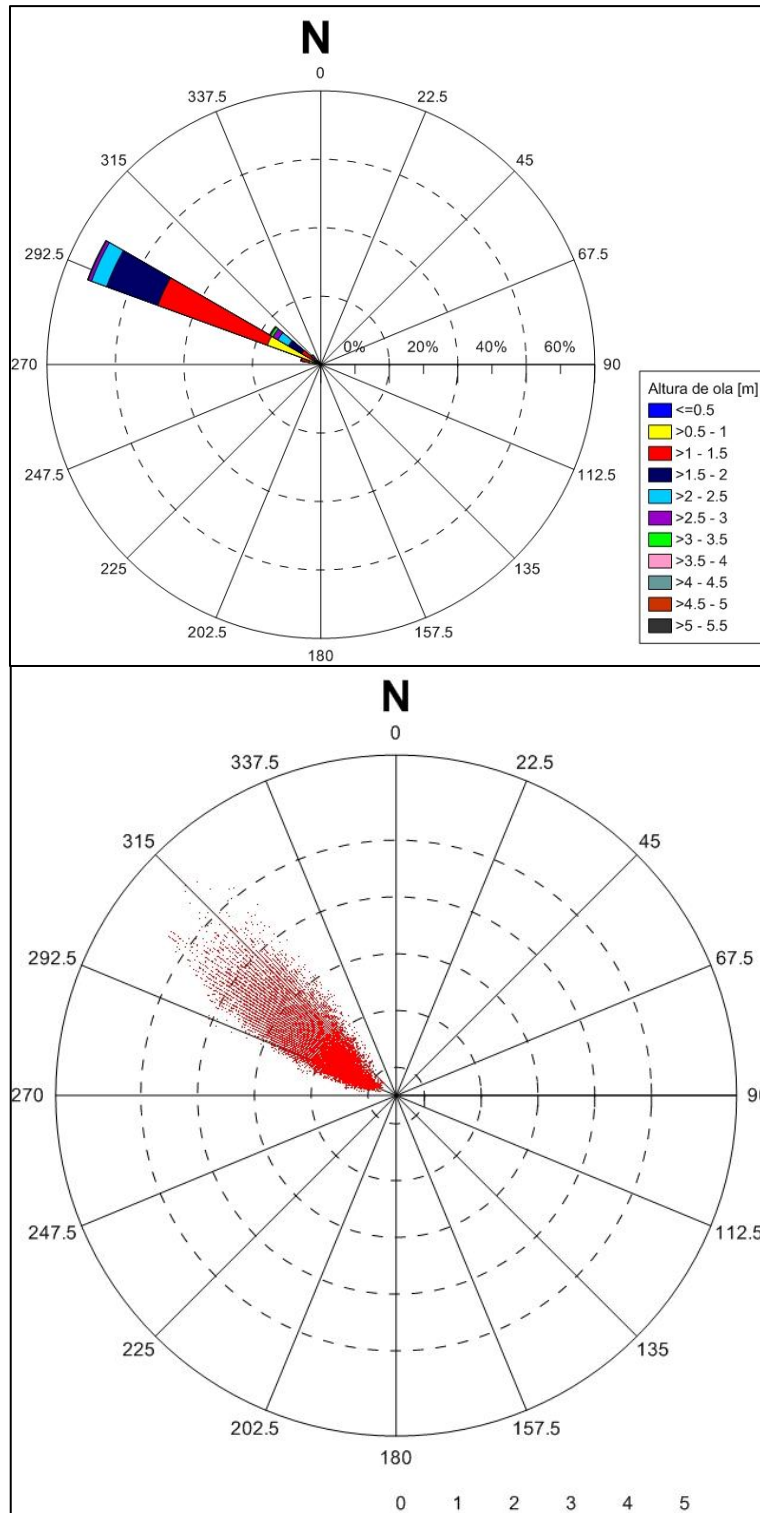
Fuente: Elaboración Propia.

Altura de ola [m]	Periodo de ola [s]									Total
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-24	
0-0,5		0,01	0,02	0,13	0,17	0,12	0,03	0,01	0,00	0,50
0,5-1	0,01	0,10	0,88	5,37	6,94	5,05	1,80	0,58	0,25	20,98
1-1,5	0,05	0,35	1,45	8,35	16,34	10,54	3,20	1,14	0,34	41,75
1,5-2	0,00	0,50	1,24	3,62	7,91	7,03	1,36	0,23	0,04	21,92
2-2,5		0,17	0,99	1,84	2,95	2,61	0,72	0,09	0,01	9,36
2,5-3		0,01	0,56	0,85	0,94	0,87	0,21	0,03	0,00	3,46
3-3,5			0,18	0,47	0,37	0,28	0,06	0,00		1,35
3,5-4			0,02	0,18	0,14	0,12	0,03	0,00		0,49
4-4,5				0,05	0,04	0,05	0,00			0,14
4,5-5				0,00	0,01	0,02				0,04
5,5+					0,00					0,00
Total	0,07	1,14	5,33	20,86	35,81	26,67	7,41	2,07	0,63	100

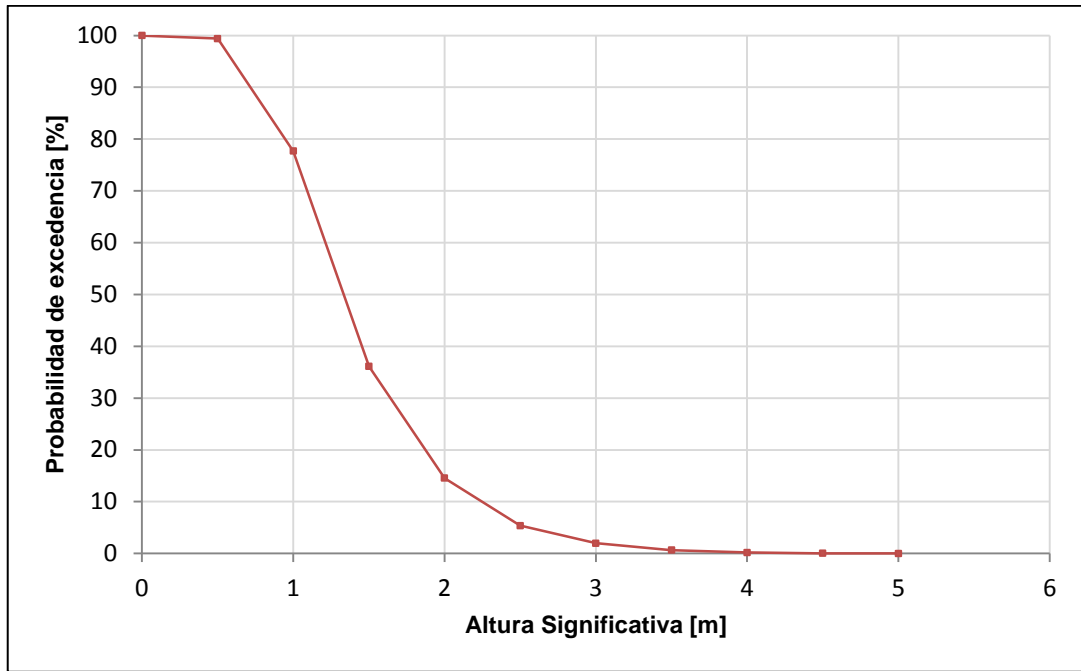
**Tabla 11-8: Tabla de incidencia de MWD y Hmo, caso Pre-Tsunami.**

Fuente: Elaboración propia.

Dirección Media [°]	Altura de ola [m]											Total
	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5	5+]	
275-280		0,01										0,01
280-285	0,01	0,17	0,03	0,00								0,22
285-290	0,07	2,04	1,20	0,10	0,00							3,41
290-295	0,17	8,87	15,43	4,01	0,48	0,04	0,00	0,00				29,00
295-300	0,17	7,33	18,32	11,27	3,79	0,76	0,13	0,02				41,79
300-305	0,05	1,87	4,44	3,88	2,63	1,10	0,38	0,14	0,04	0,00		14,53
305-310	0,01	0,46	1,44	1,49	1,33	0,76	0,40	0,14	0,05	0,02		6,12
310-315	0,01	0,13	0,56	0,71	0,68	0,44	0,25	0,11	0,03	0,01	0,00	2,94
315-320	0,00	0,05	0,23	0,31	0,32	0,28	0,16	0,05	0,02	0,00	0,00	1,44
320-325		0,03	0,09	0,13	0,11	0,07	0,03	0,01	0,00	0,00		0,47
325+		0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00					0,06
Total	0,50	20,98	41,75	21,92	9,36	3,46	1,35	0,49	0,14	0,04	0,00	100



**Figura 11-8: Rosas direccionales, caso Pre-Tsunami.**  
 Fuente: Elaboración propia



**Figura 11-9: Curva de excedencia, caso Pre-Tsunami.**  
Fuente: Elaboración propia.

## 11.4.2 POST-TSUNAMI

**Tabla 11-9: Tabla de incidencia de Hmo y Tp, caso Post-Tsunami.**

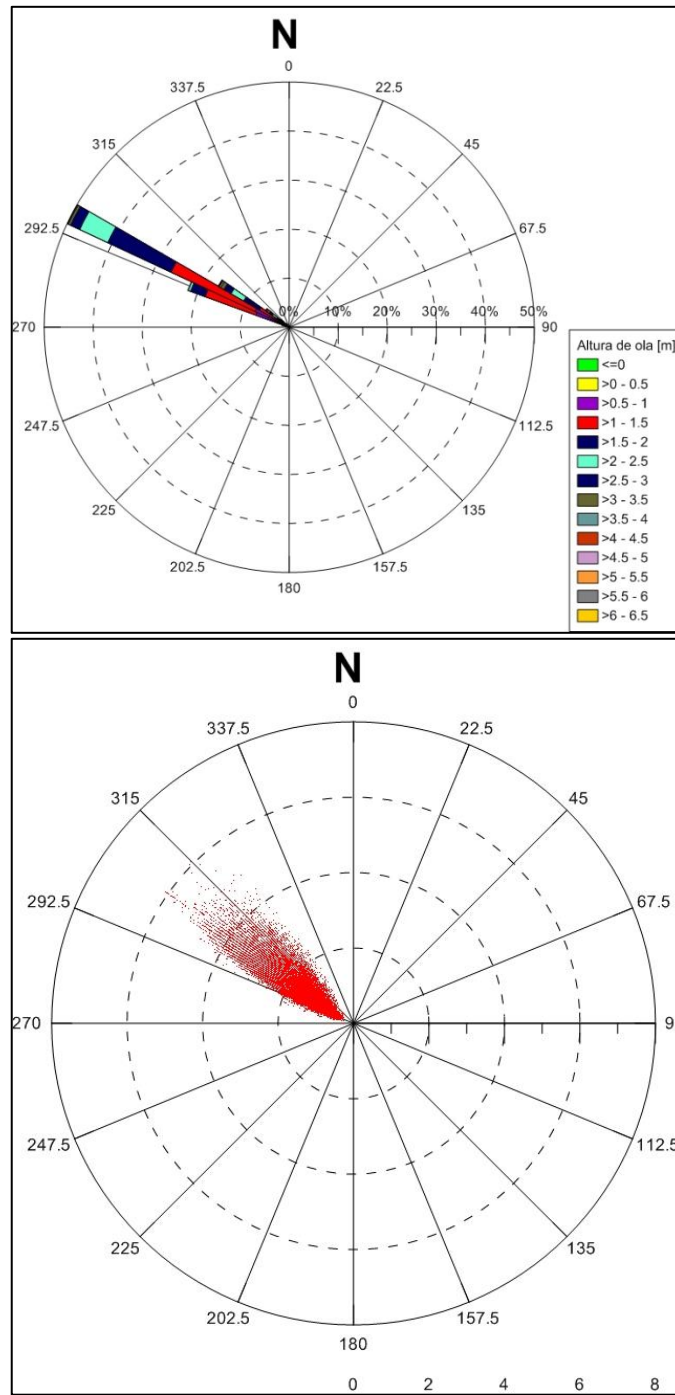
Fuente: Elaboración propia.

Altura de ola [m]	Periodo de ola [s]									Total
	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-24	
0-0,5		0,01	0,03	0,10	0,12	0,10	0,02	0,01	0,00	0,38
0,5-1	0,01	0,06	0,59	3,36	5,64	5,24	1,95	0,63	0,26	17,74
1-1,5	0,03	0,23	0,98	5,41	12,82	11,68	4,03	1,52	0,55	37,26
1,5-2		0,35	0,99	2,97	7,45	8,86	2,22	0,65	0,14	23,65
2-2,5		0,16	0,83	1,72	3,27	4,15	1,42	0,17	0,02	11,75
2,5-3		0,01	0,47	0,92	1,47	1,72	0,66	0,10	0,01	5,35
3-3,5			0,21	0,49	0,61	0,66	0,23	0,07	0,00	2,26
3,5-4			0,05	0,24	0,29	0,26	0,09	0,01		0,96
4-4,5			0,00	0,08	0,15	0,13	0,05	0,00		0,41
4,5-5				0,03	0,06	0,06	0,02			0,17
5-5,5				0,00	0,02	0,01	0,01			0,04
5,5+					0,00	0,01	0,01			0,03
Total	0,04	0,83	4,16	15,32	31,90	32,90	10,70	3,17	0,99	100

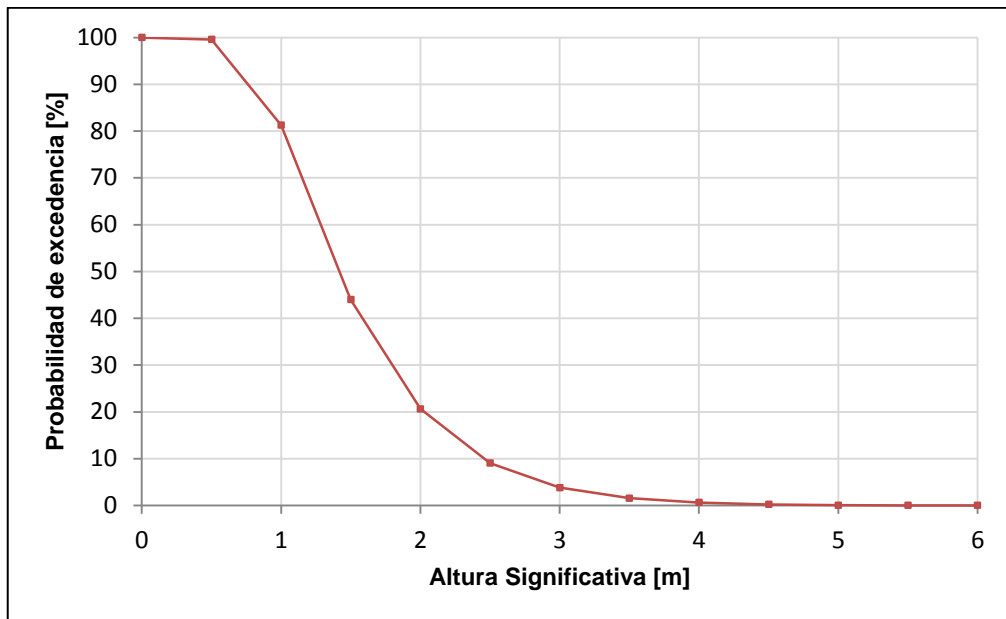
**Tabla 11-10: Tabla de incidencia de MWD y Hmo, caso Post-Tsunami.**

Fuente: Elaboración propia.

Dirección Media [°]	Altura de ola [m]												Total
	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	3-3,5	3,5-4	4-4,5	4,5-5	5-5,5	5,5+	
280-285	0,01	0,02	0,00										0,04
285-290	0,07	0,65	0,11	0,02									0,86
290-295	0,10	5,53	6,63	1,35	0,18	0,01	0,00	0,00					13,81
295-300	0,11	8,27	21,39	14,56	5,73	1,72	0,39	0,08	0,02	0,00			52,27
300-305	0,07	2,51	6,61	5,18	3,63	1,91	0,84	0,33	0,14	0,05	0,01	0,00	21,28
305-310	0,01	0,57	1,80	1,56	1,29	0,98	0,54	0,30	0,14	0,05	0,03	0,02	7,28
310-315	0,01	0,10	0,47	0,60	0,58	0,45	0,27	0,16	0,08	0,04	0,01	0,00	2,77
315-320		0,04	0,16	0,27	0,24	0,20	0,19	0,08	0,03	0,01	0,00	0,00	1,23
320-325		0,02	0,07	0,10	0,09	0,06	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00		0,40
325+		0,00	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00					0,06
Total	0,38	17,74	37,26	23,65	11,75	5,35	2,26	0,96	0,41	0,17	0,04	0,03	100

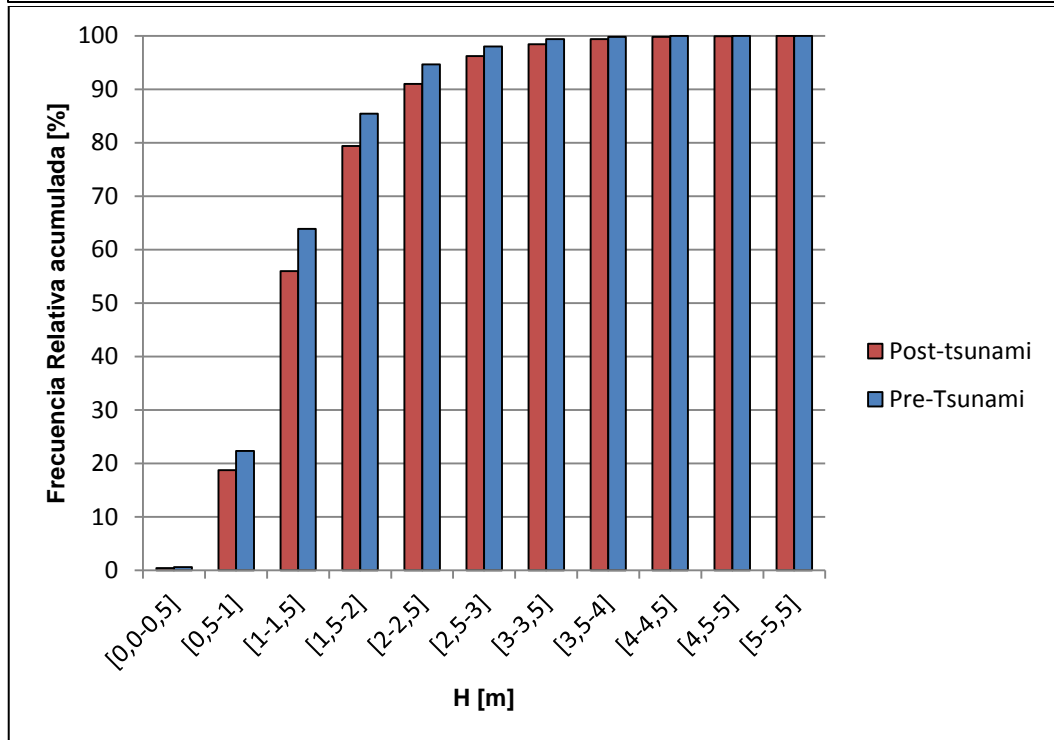
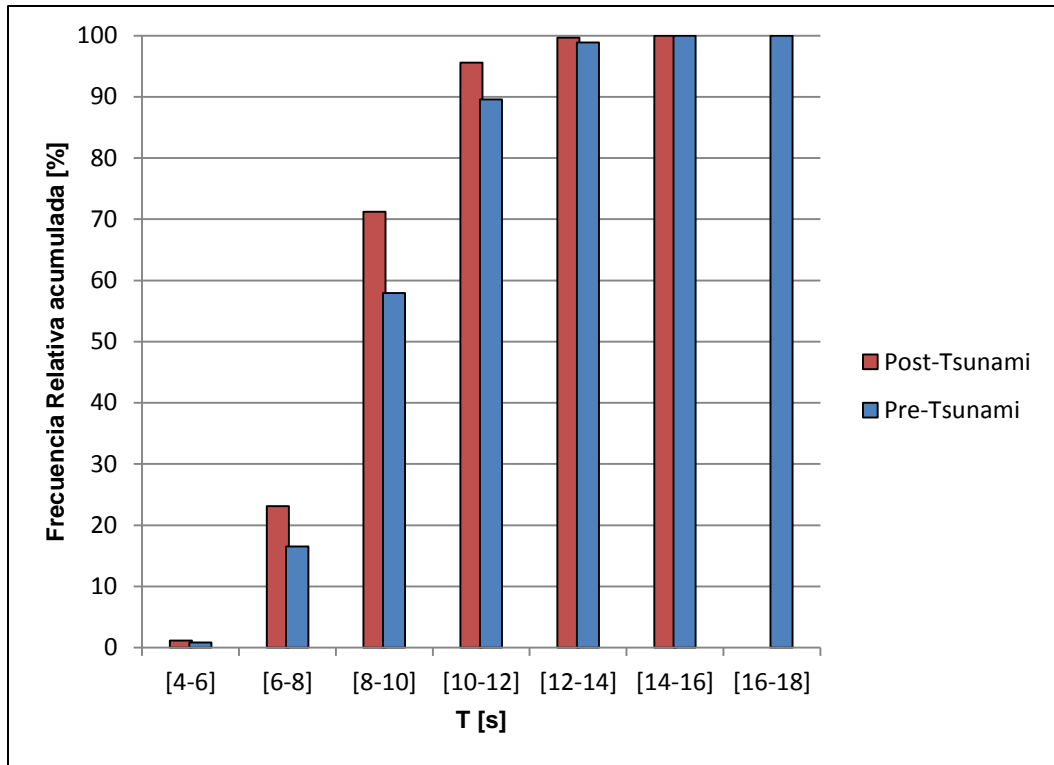


**Figura 11-10: Rosas direccionales, caso Post-Tsunami.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-11: Curva de excedencia, caso Post-Tsunami.**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-12: Histogramas de Frecuencia acumulada en función de Hmo [m] y Tp [s].**  
 Fuente: Elaboración propia.

## 11.5 ANEXO MAREAS

Tabla 11-11: Componentes armónicas en el mar, 2011.

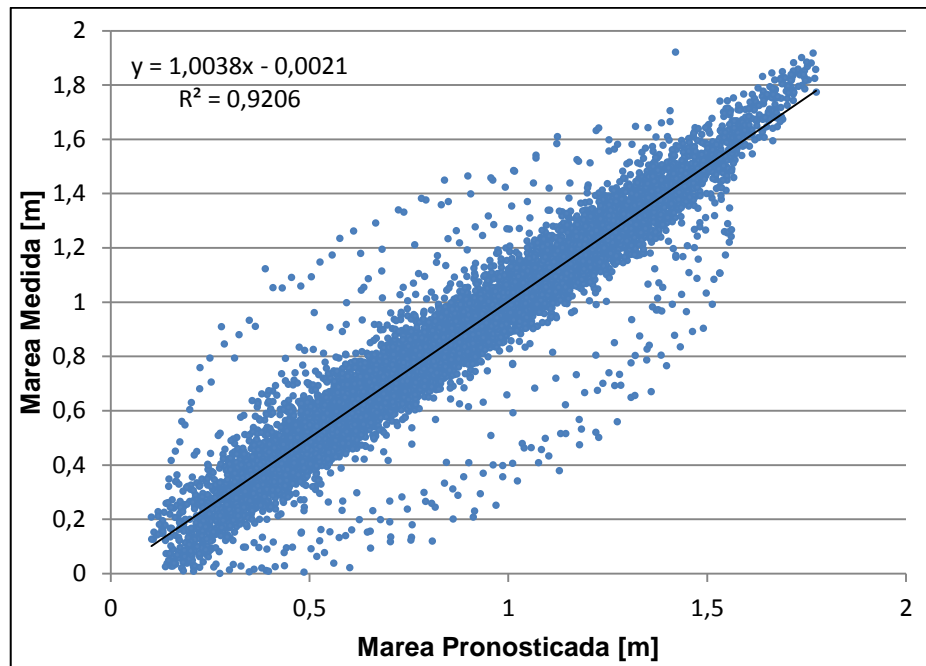
Fuente: Algoritmo t\_tide

	Amplitud [m]	Error Amplitud	Fase [°]	Fase [rad]	Error Fase	Frecuencia [c/h]	S(f)
MM	0,02	0,02	11,24	0,20	83,31	0,00	0,14
MSF	0,02	0,03	183,04	3,19	63,72	0,00	0,10
ALP1	0,00	0,01	333,18	5,82	162,76	0,03	0,00
2Q1	0,00	0,01	235,79	4,12	188,00	0,04	0,00
Q1	0,02	0,01	256,58	4,48	24,38	0,04	0,01
O1	0,11	0,01	280,72	4,90	5,51	0,04	0,16
NO1	0,01	0,01	305,52	5,33	38,62	0,04	0,00
K1	0,14	0,01	300,34	5,24	4,06	0,04	0,25
J1	0,01	0,01	357,30	6,24	85,47	0,04	0,00
OO1	0,01	0,01	58,26	1,02	72,57	0,04	0,00
UPS1	0,01	0,01	89,03	1,55	98,86	0,05	0,00
EPS2	0,01	0,02	82,11	1,43	85,01	0,08	0,00
MU2	0,01	0,02	241,54	4,22	83,38	0,08	0,00
N2	0,09	0,02	234,29	4,09	14,27	0,08	0,05
M2	0,42	0,02	264,28	4,61	2,96	0,08	1,11
L2	0,03	0,03	172,44	3,01	67,04	0,08	0,00
S2	0,17	0,02	271,10	4,73	7,20	0,08	0,17
ETA2	0,02	0,02	338,06	5,90	46,20	0,09	0,00
MO3	0,00	0,00	283,45	4,95	89,63	0,12	0,00
M3	0,00	0,00	40,76	0,71	128,87	0,12	0,00
MK3	0,00	0,00	40,88	0,71	30,29	0,12	0,00
SK3	0,00	0,00	221,96	3,87	50,37	0,13	0,00
MN4	0,00	0,00	304,12	5,31	119,03	0,16	0,00
M4	0,00	0,00	55,90	0,98	36,57	0,16	0,00
SN4	0,00	0,00	125,67	2,19	57,13	0,16	0,00
MS4	0,00	0,00	143,21	2,50	93,83	0,16	0,00
S4	0,00	0,00	65,54	1,14	258,29	0,17	0,00
2MK5	0,00	0,00	103,04	1,80	119,44	0,20	0,00
2SK5	0,00	0,00	42,49	0,74	90,29	0,21	0,00
2MN6	0,00	0,00	267,37	4,67	97,27	0,24	0,00
M6	0,00	0,00	297,25	5,19	102,57	0,24	0,00
2MS6	0,00	0,00	323,92	5,65	55,38	0,24	0,00
2SM6	0,00	0,00	108,03	1,89	160,23	0,25	0,00
3MK7	0,00	0,00	156,59	2,73	67,16	0,28	0,00
M8	0,00	0,00	37,50	0,65	118,73	0,32	0,00

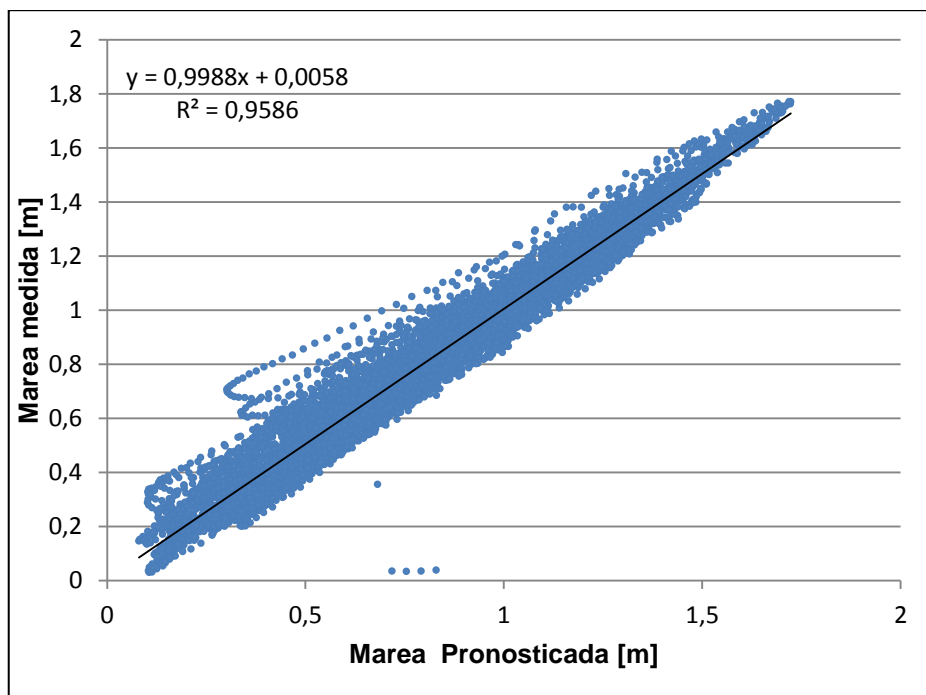
**Tabla 11-12: Componentes armónicas en el río, 2011.**

Fuente: Algoritmo t\_tide.

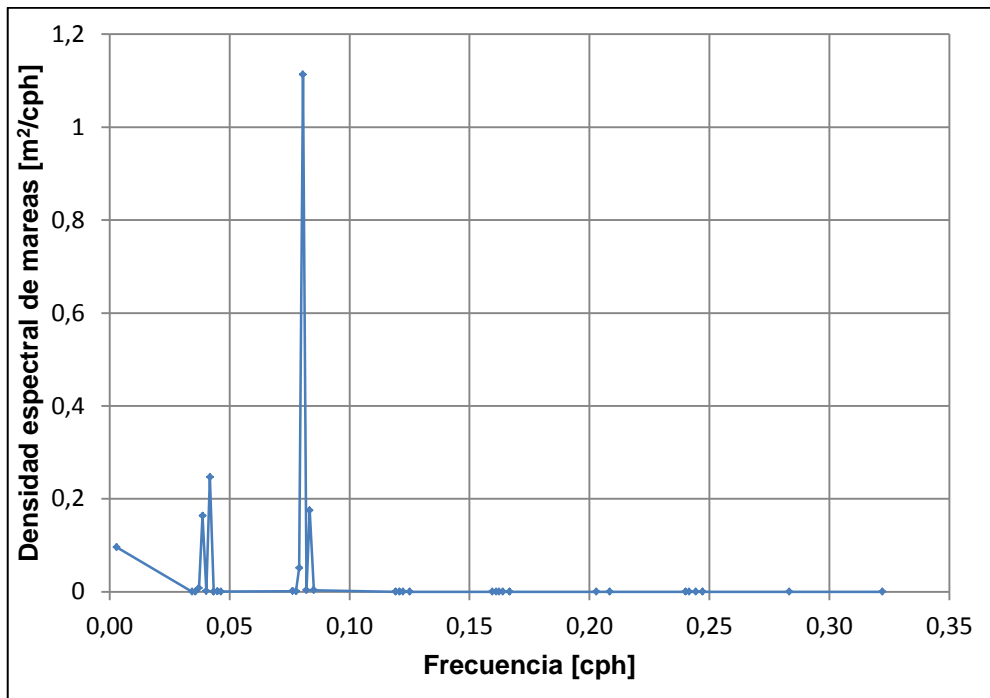
	Amplitud [m]	Error Amplitud	Fase [°]	Fase [rad]	Error Fase	Frecuencia [c/h]	S(f)
MM	0,04	0,04	19,83	68,11	0,35	0,00	0,66
MSF	0,01	0,03	175,73	166,50	3,07	0,00	0,03
ALP1	0,00	0,01	304,24	167,89	5,31	0,03	0,00
2Q1	0,01	0,01	315,38	93,42	5,50	0,04	0,00
Q1	0,03	0,01	301,62	24,42	5,26	0,04	0,01
O1	0,11	0,01	315,41	4,96	5,50	0,04	0,16
NO1	0,02	0,01	343,69	28,42	6,00	0,04	0,00
K1	0,14	0,01	336,96	3,75	5,88	0,04	0,25
J1	0,01	0,01	46,87	60,93	0,82	0,04	0,00
OO1	0,01	0,01	109,37	64,63	1,91	0,04	0,00
UPS1	0,00	0,01	153,77	139,39	2,68	0,05	0,00
EPS2	0,01	0,01	283,59	110,88	4,95	0,08	0,00
MU2	0,03	0,02	300,96	31,82	5,25	0,08	0,00
N2	0,10	0,01	299,84	7,27	5,23	0,08	0,06
M2	0,40	0,02	327,87	2,28	5,72	0,08	1,00
L2	0,02	0,02	320,52	47,41	5,59	0,08	0,00
S2	0,15	0,01	332,99	5,69	5,81	0,08	0,14
ETA2	0,00	0,01	69,43	157,91	1,21	0,09	0,00
MO3	0,00	0,00	143,67	61,22	2,51	0,12	0,00
M3	0,00	0,00	261,47	157,87	4,56	0,12	0,00
MK3	0,00	0,00	151,46	83,26	2,64	0,12	0,00
SK3	0,00	0,00	256,08	127,99	4,47	0,13	0,00
MN4	0,00	0,00	215,12	69,51	3,75	0,16	0,00
M4	0,01	0,00	225,67	19,66	3,94	0,16	0,00
SN4	0,01	0,00	243,26	34,39	4,25	0,16	0,00
MS4	0,01	0,00	234,79	22,44	4,10	0,16	0,00
S4	0,00	0,00	248,81	57,97	4,34	0,17	0,00
2MK5	0,00	0,00	228,03	51,99	3,98	0,20	0,00
2SK5	0,00	0,00	161,37	44,05	2,82	0,21	0,00
2MN6	0,00	0,00	16,55	40,49	0,29	0,24	0,00
M6	0,00	0,00	20,00	29,11	0,35	0,24	0,00
2MS6	0,00	0,00	8,92	87,11	0,16	0,24	0,00
2SM6	0,00	0,00	278,14	73,96	4,85	0,25	0,00
3MK7	0,00	0,00	352,88	74,10	6,16	0,28	0,00
M8	0,00	0,00	142,54	34,23	2,49	0,32	0,00



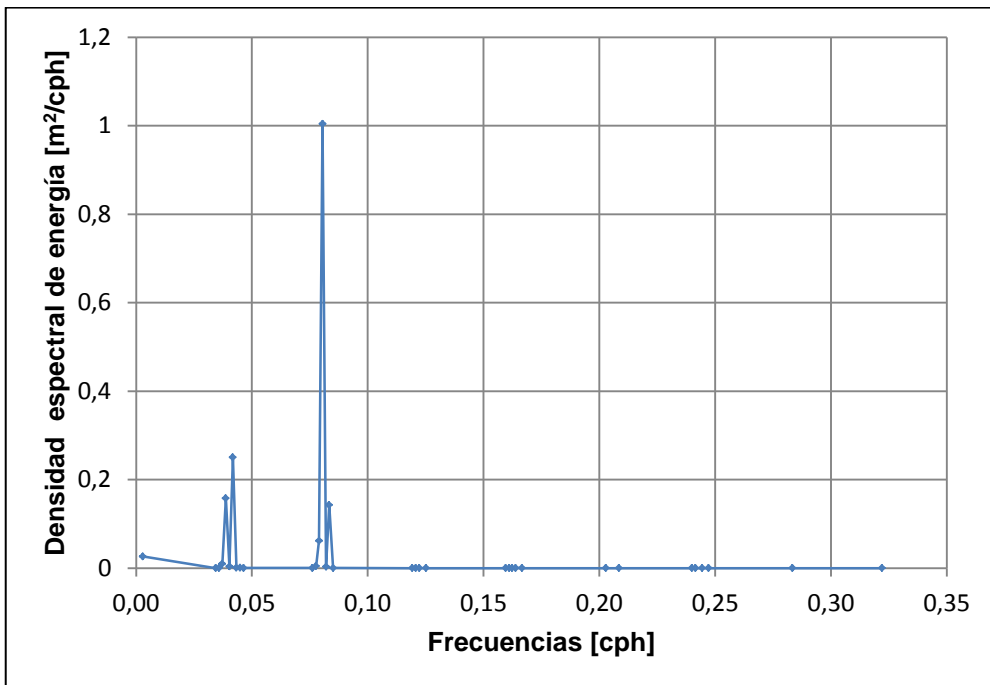
**Figura 11-13: Correlación mareas en el mar, 2011.**  
Fuente: Elaboración propia.



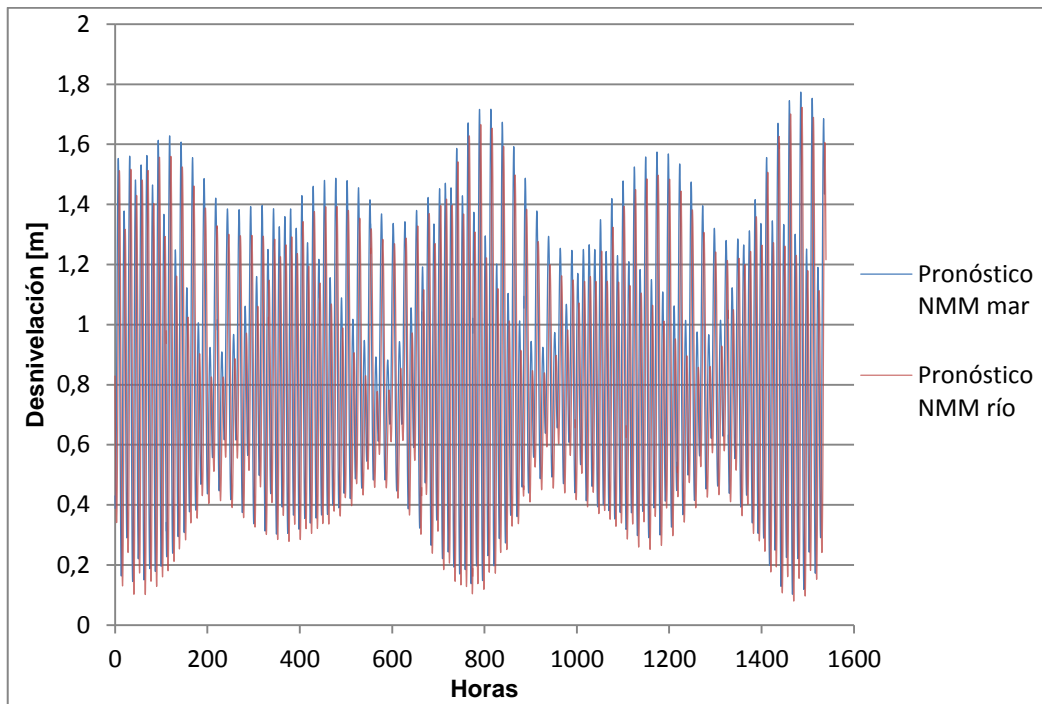
**Figura 11-14: Correlación mareas en el río, 2011.**  
Fuente: Elaboración propia.



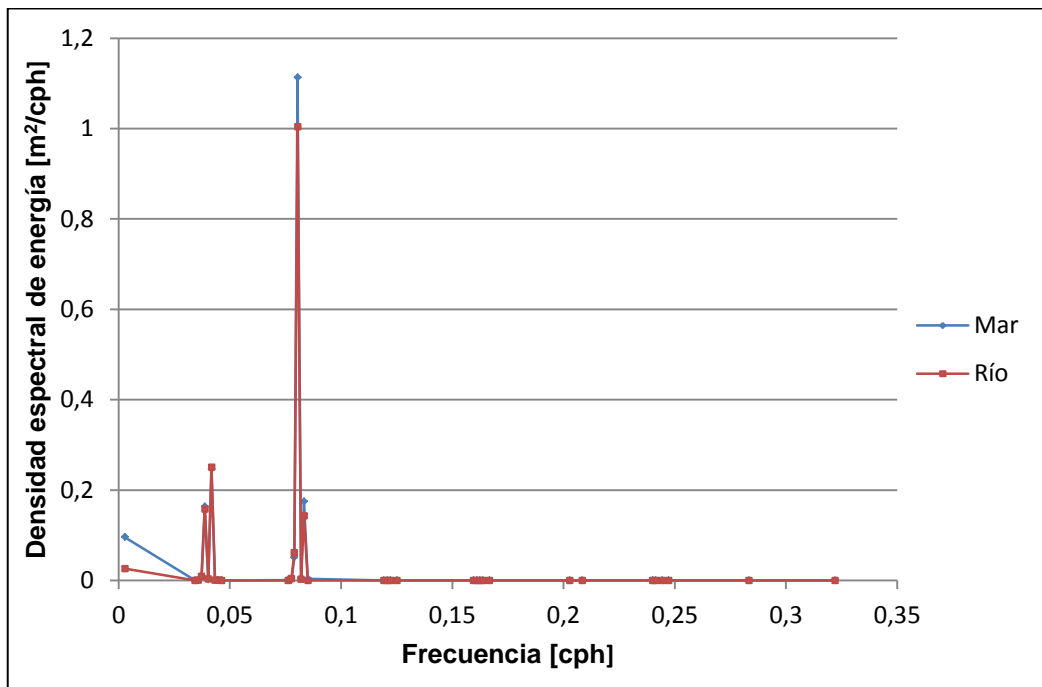
**Figura 11-15: Densidad espectral de energía en el mar, 2011.**  
 Fuente: Elaboración propia.



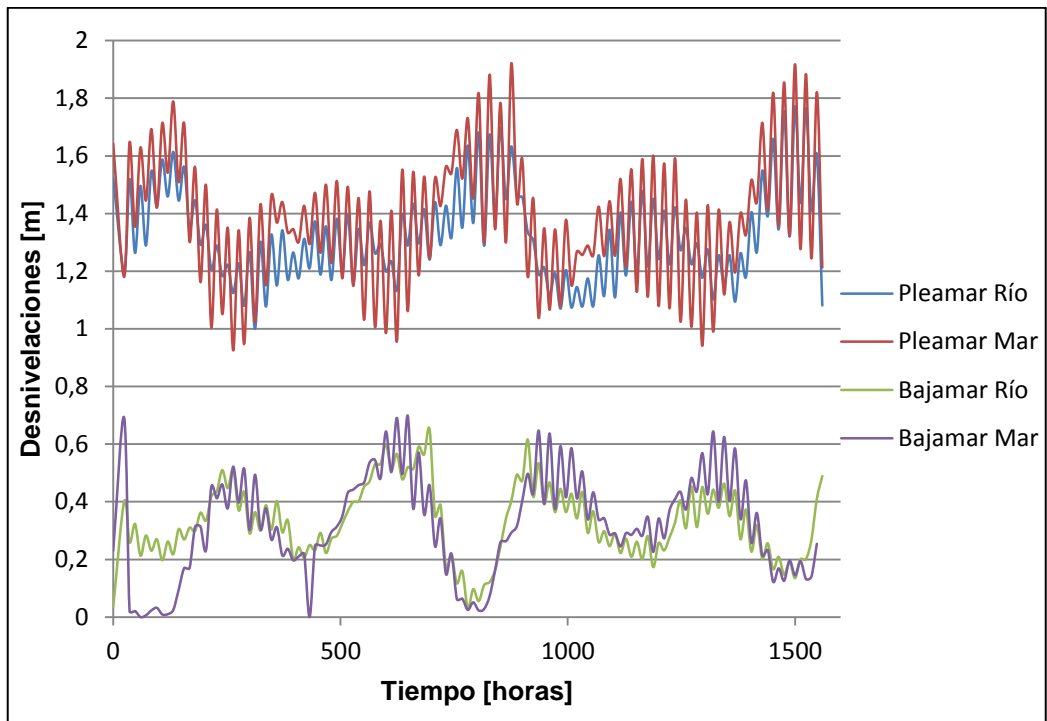
**Figura 11-16: Densidad espectral de energía en el río, 2011.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-17: Comparación NMM, análisis armónico, 2011.**  
 Fuente: Elaboración propia.

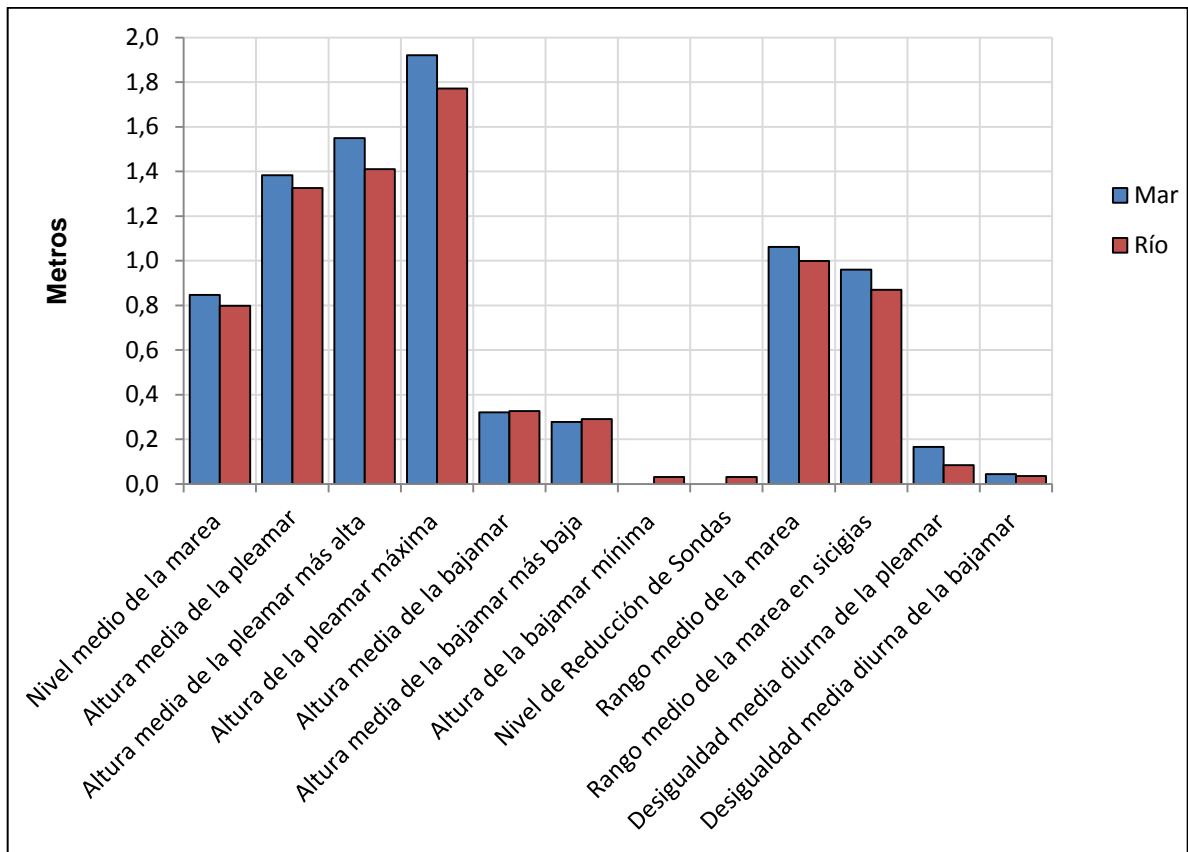


**Figura 11-18: Comparación de densidades espectrales de energía, 2011.**  
 Fuente: Elaboración propia.



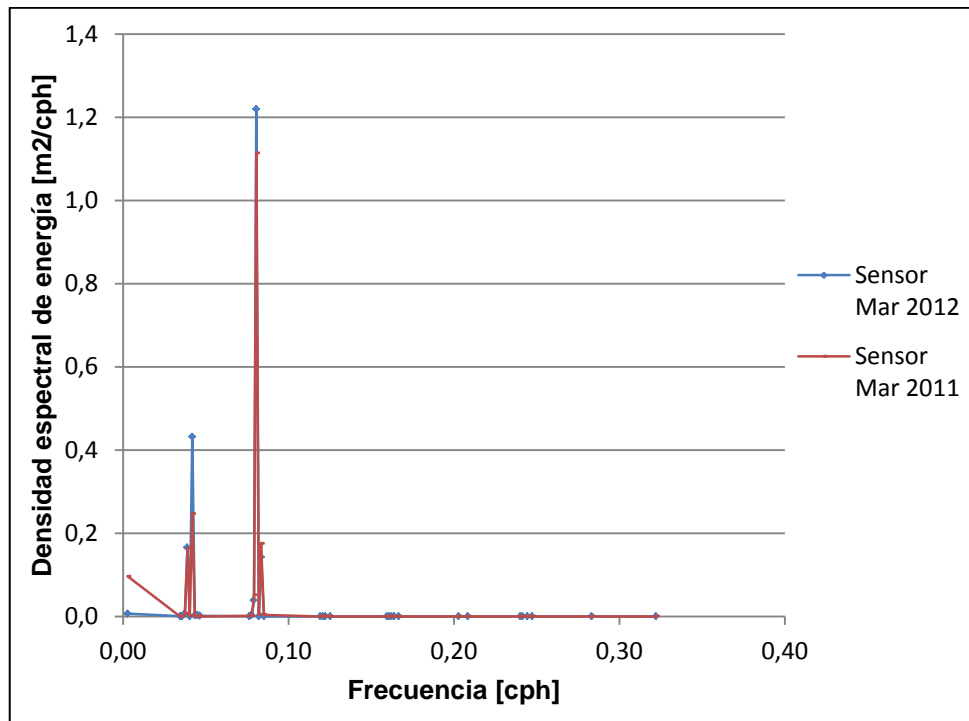
**Figura 11-19: Pleamar y bajamar, campaña 2011.**

Fuente: Elaboración propia.

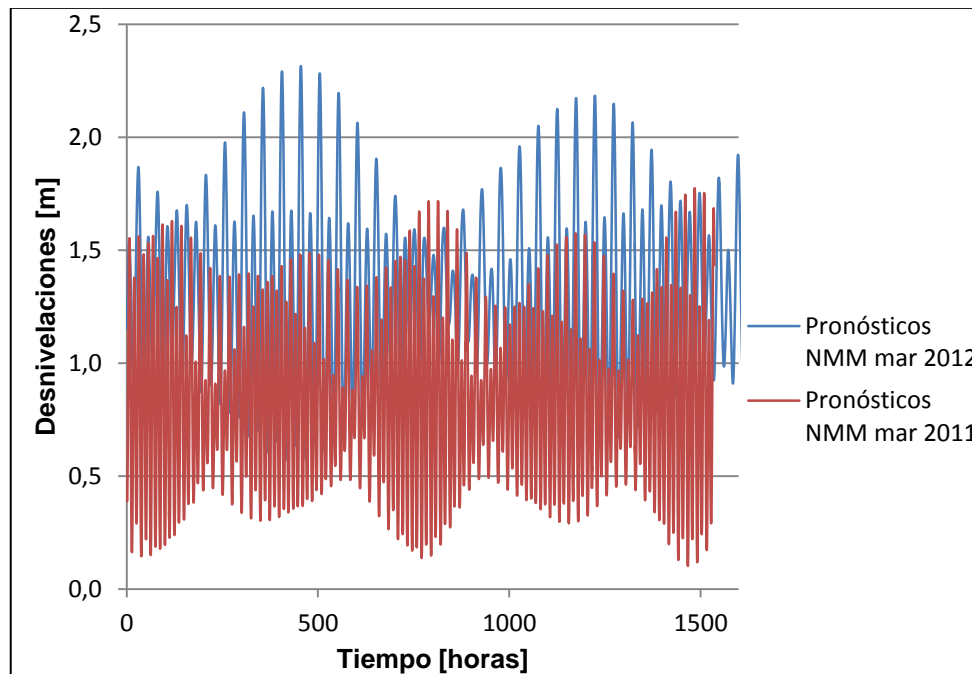


**Figura 11-20: Comparación parámetros No Armónicos, 2011.**

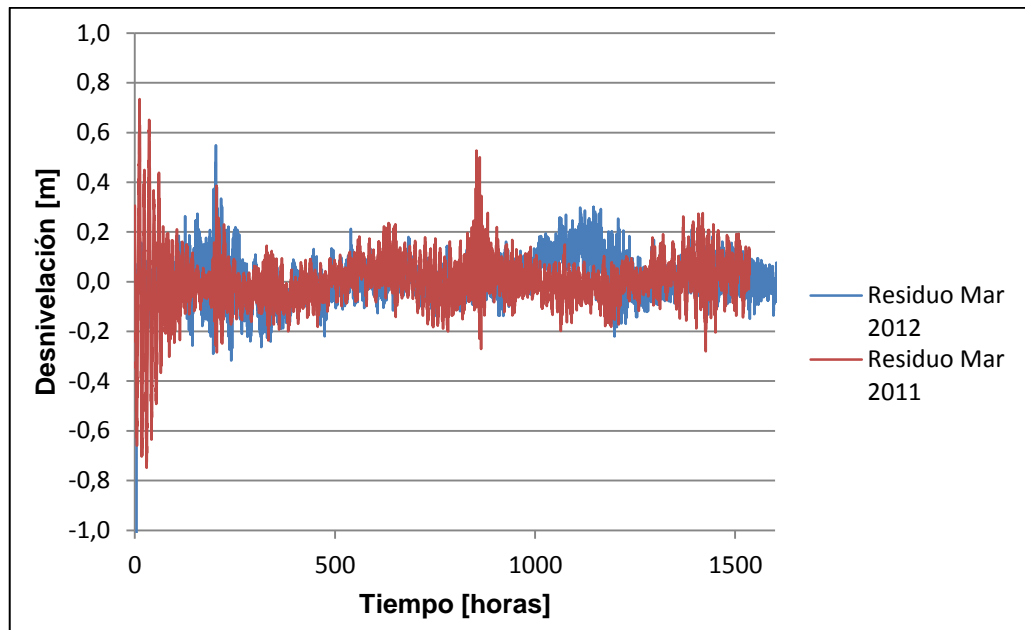
Fuente: Elaboración propia.



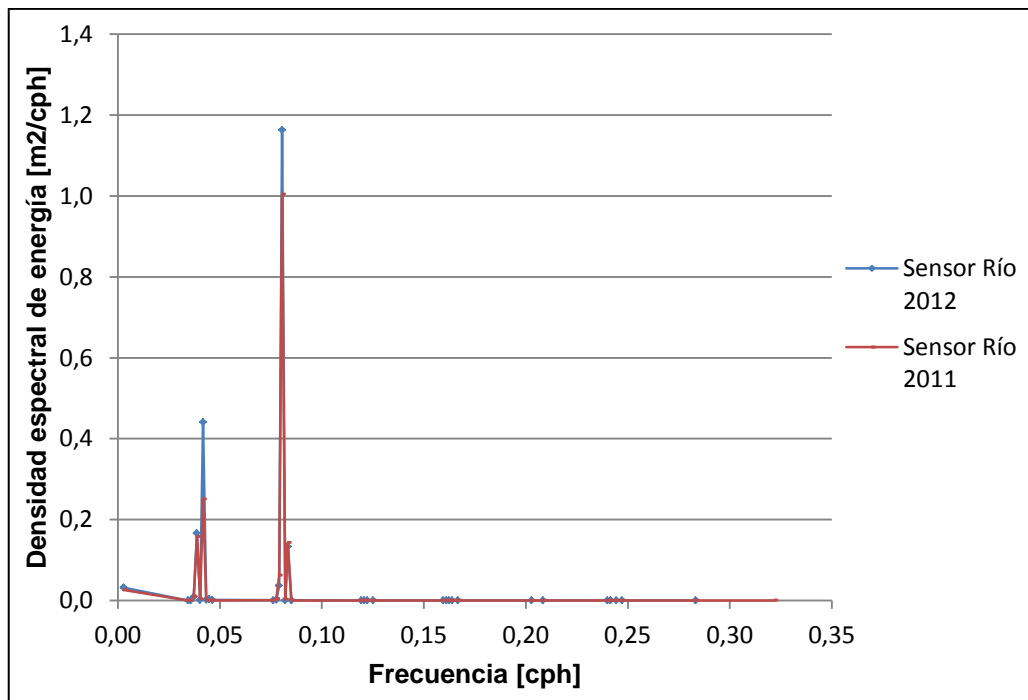
**Figura 11-21: Comparación densidad espectral en sensor Mar, 2011 y 2012.**  
 Fuente: Elaboración propia.



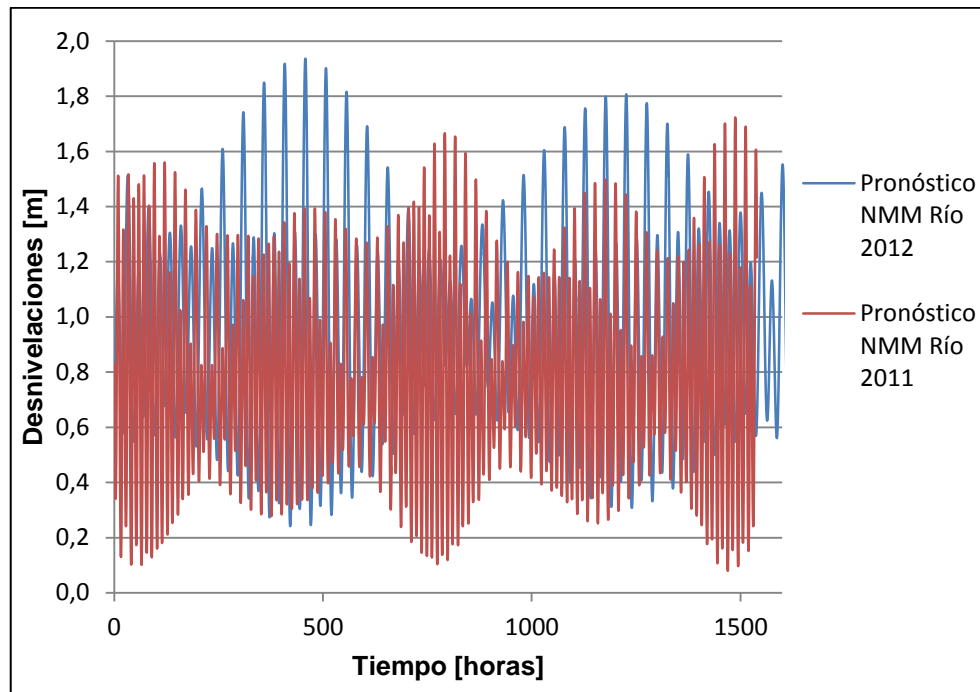
**Figura 11-22: Comparación Pronósticos NMM en sensor Mar, 2011 y 2012.**  
 Fuente: Elaboración propia.



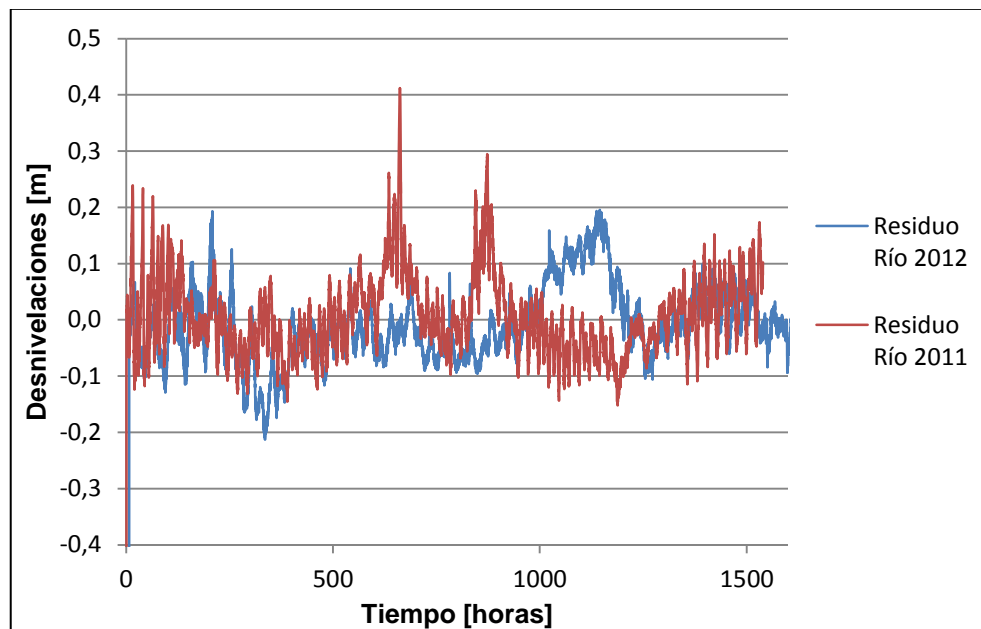
**Figura 11-23: Comparación Flujos Residuales en sensor Mar, 2011 y 2012.**  
 Fuente: Elaboración propia.



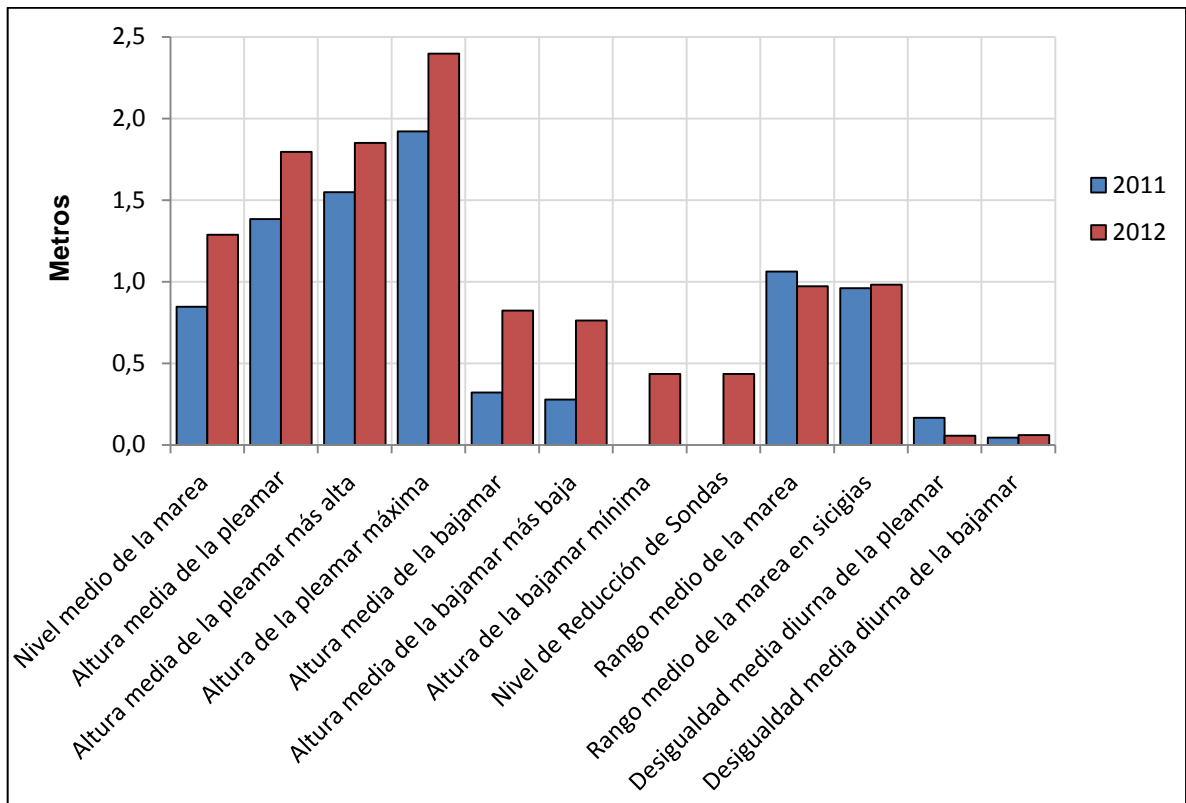
**Figura 11-24: Comparación densidad espectral en sensor Río, 2011 y 2012.**  
 Fuente: Elaboración propia.



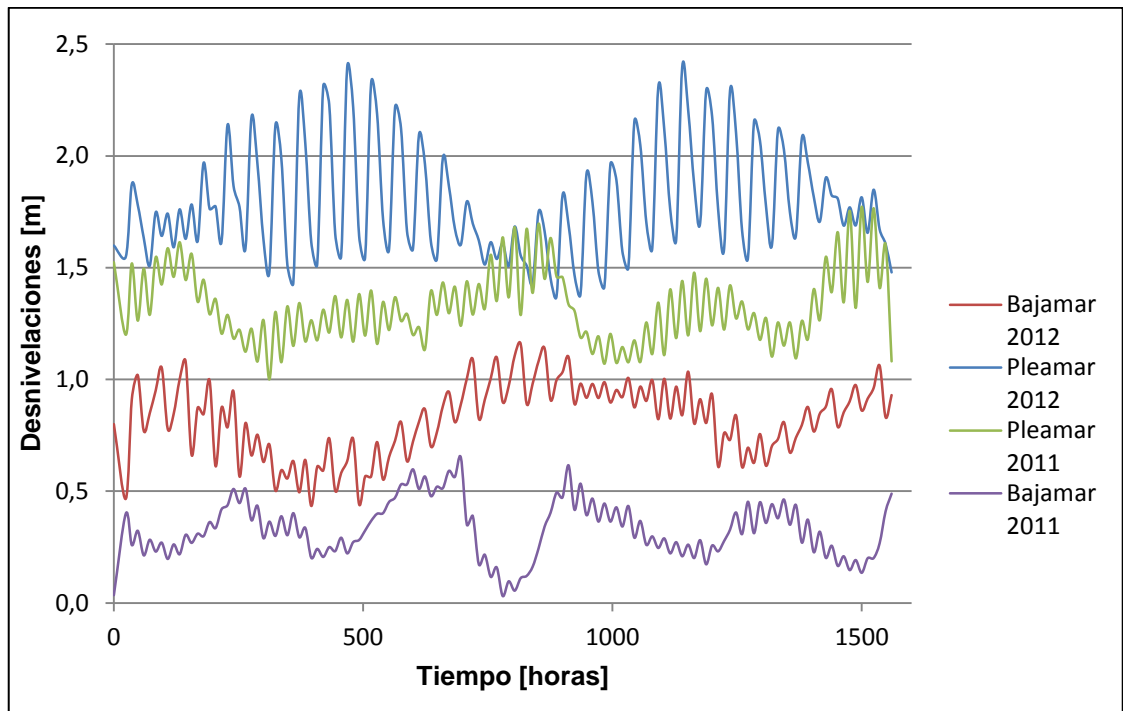
**Figura 11-25: Comparación Pronósticos NMM en sensor Río, 2011 y 2012.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-26: Comparación Flujos Residuales en sensor Río, 2011 y 2012.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-27: Comparación parámetros No Armónicos en sensor Mar, 2011 y 2012.**  
 Fuente: Elaboración propia.



**Figura 11-28: Pleamar y bajamar en el sensor Mar, campaña 2011 y 2012.**  
Fuente: Elaboración propia.