



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**INFLUENCIA DE LA BATIMETRÍA LOCAL EN LA
MODELACIÓN DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE MEDIANTE
MIKE 21 SW, APLICADO A CURAUMILLA Y LEBU**

Ivette Fernández Aneiva

Octubre 2018

**INFLUENCIA DE LA BATIMETRÍA LOCAL EN LA MODELACIÓN DE PROPAGACIÓN DE OLEAJE
MEDIANTE MIKE 21 SW, APLICADO A CURAUMILLA Y LEBU**

Ivette Fernández Aneiva

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

NOMBRE REVISOR 1

Luis Zamorano

Profesor Guía

NOMBRE REVISOR 2

Patricio Winckler

NOMBRE REVISOR 3

Gubbler Otarola

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.

Agradezco al Instituto Nacional de Hidráulica, quien como institución me brindó la oportunidad y el apoyo, para desarrollar mi proyecto en sus dependencias. También agradezco a los profesores, que gracias a su política de “puertas abiertas” siempre tuvieron la disposición de aportar con sus conocimientos. Finalmente doy las gracias a mi familia y amigos por ser parte de este proceso.

RESUMEN

En el área de Ingeniería marítima y costera, actualmente, se observa una tendencia creciente en cuanto al empleo de modelos numéricos para caracterizar las condiciones de oleaje en sectores cercanos a la costa. Resolviendo los procesos de transformación de oleaje desde aguas profundas hacia aguas someras, mediante modelos numéricos de propagación de oleaje, es posible obtener los parámetros que permiten el diseño de una amplia gama de obras civiles proyectadas en el borde costero, tales como construcción de playas artificiales, proyectos portuarios, defensas costeras, etc. Metodológicamente, la batimetría local de cada sector en estudio, corresponde a un dato fundamental de entrada del modelo, cuya obtención requiere costosas campañas de levantamiento batimétrico de detalle, que en general suelen extenderse hasta profundidades cercanas a los - 100 [m].

En la literatura existen investigaciones que dan cuenta de una “baja” sensibilidad de los resultados de las modelaciones de oleaje, respecto de la resolución espacial de los sondeos batimétricos en el dominio de modelación. En este contexto, y en el marco del proyecto “Catastro del Recurso Energético, asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de Energía Undimotriz”, (en adelante “Undimotriz”), como trabajo de tesis se sensibilizan los estadígrafos del oleaje; altura significativa (H_{mo}), periodo medio (T_m) y dirección media (D_m), en puntos ubicados cerca de la costa, a partir de modelaciones numéricas aplicadas en dos bahías de Chile, que varían en la extensión de los sondeos batimétricos utilizados en la definición de la superficie de modelación de entrada al modelo. Las zonas de estudio corresponden a la bahía de Curaumilla en la Región de Valparaíso, y Lebu en la Región del BíoBío, en ambas localidades se aplica la misma metodología.

La propagación espectral de oleaje es desarrollada con el software Mike 21 SW (DHI). Como condición de borde se utilizan registros espectrales de oleaje medidos con boyas Triaxys en aguas profundas, posicionadas frente a ambas bahías. Para efectos de calibración del modelo numérico, se utilizan registros obtenidos mediante la instalación de 1 ADCP en cada una de las bahías de estudio. Se modelan 5 superficies batimétricas de entrada o escenarios que varían en cuanto a la información de sondeos de detalle utilizados, para la construcción de la batimetría. Las diferencias entre los estadígrafos del oleaje modelados, se analizan en diversos puntos distribuidos al interior de las bahías en estudio, y particularmente en profundidades de -40, -60, -80 y -100 [m] y respecto a diferentes fuentes de información

batimétrica. Complementariamente para cada escenario se incluye un análisis estadístico de las diferencias entre los valores modelados y los datos de campo registrados en aguas someras. Los estadísticos corresponden al error cuadrático medio (RMSE), SESGO y diferencia porcentual.

CONTENIDOS

RESUMEN	5
GLOSARIO.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	14
2. OBJETIVOS Y ALCANCES	15
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1 TEORÍA DEL OLAJE	17
3.1.1 <i>Caracterización estadística de oleaje</i>	18
3.1.2 <i>Definición de estado de mar</i>	19
3.1.3 <i>Definición espectral del oleaje</i>	19
3.1.4 <i>Teoría lineal de oleaje</i>	21
3.2 DESCRIPCIÓN MODELO MIKE 21 SW.....	23
3.3 PARÁMETROS ESPECTRALES.....	26
3.4 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN DE SONDAJES	27
3.4.1 <i>Método kriging</i>	28
3.4.2 <i>Triangulación con interpolación lineal</i>	28
3.4.3 <i>Vecino más cercano</i>	29
3.5 PARÁMETROS DE ERROR	30
4. METODOLOGÍA	31
4.1 ZONAS DE ESTUDIO	31
4.2 ANTECEDENTES	32
4.2.1 <i>Batimetría</i>	32
4.2.2 <i>Datos de oleaje</i>	38
4.3 DISEÑO METODOLÓGICO	43
5. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.....	44
5.1 DOMINIO DE MODELACIÓN.....	44
5.2 CONDICIÓN DE BORDE	47
5.3 MALLA DEL MODELO	56
5.4 INTERPOLACIÓN BATIMÉTRICA DE LOS SONDAJES.....	62
5.5 PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO	67

6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS BATIMÉTRICOS.....	70
6.1	DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS BATIMÉTRICOS	70
6.2	PARÁMETROS DE ERROR DE LOS ESTADÍGRAFOS MODELADOS	75
6.2.1	<i>Curaumilla</i>	75
6.2.2	<i>Lebu</i>	81
6.2.3	<i>Análisis de parámetros estadígrafos para períodos entre 10-13 [s]</i>	86
6.3	DISPERSIÓN DE LOS RESULTADOS EN PERFILES TRANSVERSALES A LA LÍNEA DE COSTA	91
6.3.1	<i>Curaumilla</i>	91
6.3.2	<i>Lebu</i>	97
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
8.	BIBLIOGRAFÍA	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3-1 DESARROLLO DEL OLAJE. FUENTE: (KOMAR, 1998).	17
FIGURA 3-2 EJEMPLO DE UNA MEDICIÓN DE OLAJE. FUENTE: (HOLTHUIJSEN, 2007).	18
FIGURA 3-3 RESULTADO DE TRANSFORMAR UN REGISTRO EN LOS ESPECTROS DE AMPLITUD Y FASE. FUENTE: (HOLTHUIJSEN, 2007).	18
FIGURA 3-4 EJEMPLO DE ESPECTRO 1(D). FUENTE: (INH, 2014).	21
FIGURA 3-5 EJEMPLO DE ESPECTRO 2(D) DE BOYA TRIAXYS FECHA 06-05-12 07:00. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	21
FIGURA 4-1 ZONAS DE ESTUDIO, CURAUMILLA (A) Y LEBU (B). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	31
FIGURA 4-2 BATIMETRÍA A) GEBCO , B) ETOPO Y C) SHOA PARA CURAUMILLA (A) Y LEBU (B).	36
FIGURA 4-3 ECOSONDA SYQWEST MODELO HYDROBOX DE 200-33KHZ.	36
FIGURA 4-4 LÍNEAS DE SONDAJES BATIMÉTRICOS EN CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	37
FIGURA 4-5 MANIOBRA DE INSTALACIÓN DE LA BOYA TRIAXYS EN CURAUMILLA. FUENTE: PROYECTO UNDIMOTRIZ.	38
FIGURA 4-6 MOVIMIENTOS QUE AFECTAN A LA BOYA TRIAXYS.	39
FIGURA 4-7 POSICIÓN GEOGRÁFICA DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE OLAJE EN AGUAS PROFUNDAS, CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	40
FIGURA 4-8: ADCP RDI TELEDYNE WHSW600.	41
FIGURA 4-9 POSICIÓN GEOGRÁFICA DEL INSTRUMENTO DE MEDICIÓN DE OLAJE EN AGUAS SOMERAS, CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	42
FIGURA 5-1 DOMINIO DE MODELACIÓN, ZONA DE CURAUMILLA (A). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	45
FIGURA 5-2 DOMINIO DE MODELACIÓN, ZONA DE LEBU (B). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	46
FIGURA 5-3 SERIE DE TIEMPO CONDICIÓN DE BORDE V/S MODELO EN BOYA CURAUMILLA PARA HMO, Tm, DM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	49
FIGURA 5-4 SERIE DE TIEMPO CONDICIÓN DE BORDE V/S MODELO EN BOYA LEBU PARA HMO, Tm, DM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	50
FIGURA 5-5 CORRELACIÓN LINEAL ENTRE RESULTADOS MODELADOS V/S DATOS BOYA, PARA HMO, Tm Y DM EN A) CURAUMILLA Y B) LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	51
FIGURA 5-6 SERIE DE TIEMPO DE CURAUMILLA Y LEBU DE CONDICIÓN DE BORDE DE HMO, Tm Y DM,. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	53
FIGURA 5-7 ROSAS DE OLAJE DE HMO Y Tm PARA CONDICIÓN DE BORDE, CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	55
FIGURA 5-8 SUBÁREAS DE MALLAS PARA CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	57
FIGURA 5-9 MALLA MODELO CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	60
FIGURA 5-10 DISPERSIÓN DE HMO, Tm Y DM PARA MALLA DE A) CURAUMILLA Y B) LEBU. MALLA FINA (EJE DE ABCISA) Y MALLA 3 (EJE DE ORDENADA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	61
FIGURA 5-11 INTERPOLACIÓN BATIMÉTRICA CON TRIANGULACIÓN LINEAL CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	65
FIGURA 5-12 DISPERSIÓN DE HMO, Tm Y DM PARA INTERPOLACIÓN BATIMÉTRICA CON TRIANGULACIÓN LINEAL A) CURAUMILLA Y B) LEBU. ADCP (EJE DE ABCISA) Y EL MODELO (EJE DE ORDENADA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	66

FIGURA 6-1 CURVAS DE NIVEL DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	72
FIGURA 6-2 CURVAS DE NIVEL DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	73
FIGURA 6-3 CORTE TRANSVERSAL PARA CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	74
FIGURA 6-4 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS, PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA Y SERIE DE TIEMPO (HMO), DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	77
FIGURA 6-5 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS, PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA Y SERIE DE TIEMPO (TM), DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	78
FIGURA 6-6 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS, PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA Y SERIE DE TIEMPO (DM), DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 6-7 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS, PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA Y SERIE DE TIEMPO (HMO), DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
FIGURA 6-8 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS, PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA Y SERIE DE TIEMPO (TM) DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	83
FIGURA 6-9 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS, PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA Y SERIE DE TIEMPO (DM), DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 6-10 SERIE DE TIEMPO DE (HMO, TM, DM) PARA EL ANÁLISIS DE PERIODOS ENTRE 10 Y 13 [s], DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	88
FIGURA 6-11 SERIE DE TIEMPO DE (HMO, TM, DM) PARA EL ANÁLISIS DE PERIODOS ENTRE 10 Y 13 [s], DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS RESPECTO A ADCP, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	89
FIGURA 6-12 PERFILES TRANSVERSALES A LA LÍNEA DE COSTA, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	92
FIGURA 6-13 PROMEDIO TEMPORAL MÍNIMO, MÁXIMO Y PROMEDIO; DISPERSIÓN MÍNIMA, MÁXIMA Y PROMEDIO DE LAS ALTURAS SIGNIFICATIVA (HMO) DE LA SERIE, PARA PERFILES NORTE Y SUR, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	94
FIGURA 6-14 PROMEDIO TEMPORAL MÍNIMO, MÁXIMO Y PROMEDIO; DISPERSIÓN MÍNIMA, MÁXIMA Y PROMEDIO DE LOS PERIODOS MEDIOS (TM) DE LA SERIE, PARA PERFILES NORTE Y SUR, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	95
FIGURA 6-15 PROMEDIO TEMPORAL MÍNIMO, MÁXIMO Y PROMEDIO; DISPERSIÓN MÍNIMA, MÁXIMA Y PROMEDIO DE LAS ALTURAS MEDIAS (DM) DE LA SERIE, PARA PERFILES NORTE Y SUR, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	96
FIGURA 6-16 PERFILES TRANSVERSALES A LA LÍNEA DE COSTA, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	97
FIGURA 6-17 PROMEDIO TEMPORAL Y DISPERSIÓN DE (HMO) DE LA SERIE, PARA PERFILES NORTE Y SUR, LEBU.	99
FIGURA 6-18 PROMEDIO TEMPORAL Y DISPERSIÓN DE (TM) DE LA SERIE, PARA PERFILES NORTE Y SUR, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	100
FIGURA 6-19 PROMEDIO TEMPORAL Y DISPERSIÓN DE (DM) DE LA SERIE, PARA PERFILES NORTE Y SUR, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	101

LISTA DE TABLAS

TABLA 4-1 CARTAS NÁUTICAS DEL SHOA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.34

TABLA 4-2 LÍMITES CORRESPONDIENTES A LOS SONDAJES DE DETALLE, CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.37

TABLA 4-3 POSICIÓN GEOGRÁFICA, PROFUNDIDAD DE FONDEO Y FECHAS DE MEDICIÓN DE OLEAJE EN AGUAS PROFUNDAS, CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.39

TABLA 4-4 POSICIÓN GEOGRÁFICA, PROFUNDIDAD DE FONDEO Y FECHAS DE MEDICIÓN DE OLEAJE EN AGUAS SOMERAS, CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.41

TABLA 5-1 VÉRTICES EXTREMOS DEL DOMINIO MODELACIÓN, CURAUMILLA (A). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.45

TABLA 5-2 VÉRTICES EXTREMOS DEL DOMINIO DE MODELACIÓN, LEBU (B). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.46

TABLA 5-3 CONDICIÓN DE BORDE DE LOS MODELOS DE CURAUMILLA Y LEBU.52

TABLA 5-4 TABLA DE INCIDENCIA DE HMO-TM, CURAUMILLA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.54

TABLA 5-5 TABLA DE INCIDENCIA DE HMO-TM, LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.54

TABLA 5-6 NODOS Y ELEMENTOS ELECCIÓN MALLAS CURAUMILLA Y LEBU.58

TABLA 5-7 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE ERROR DEL MODELO PARA HMO, TM, DM SEGÚN DIFERENTES MALLAS, A) CURAUMILLA Y B) LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.58

TABLA 5-8 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE ERROR DEL MODELO PARA HMO, TM, DM SEGÚN DIFERENTES INTERPOLACIONES, CURAUMILLA Y LEBU. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.63

TABLA 5-9 CASOS EVALUADOS EN LA SENSIBILIDAD DE PARÁMETROS DE AJUSTE, CURAUMILLA.68

TABLA 5-10 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE ERROR DEL MODELO PARA HMO, TM, DM SEGÚN PARÁMETROS FÍSICOS DEL MODELO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.68

TABLA 5-11 TIEMPO DE CÓMPUTO DE CASOS PRE SELECCIONADOS RESPECTO A LOS PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO.69

TABLA 6-1 NOMENCLATURA DE ESCENARIOS BATIMÉTRICOS, PARA CURAUMILLA Y LEBU.70

GLOSARIO

Aguas profundas: Se considera que el oleaje está en aguas profundas, cuando la profundidad relativa, o cociente entre la profundidad del agua y la longitud de onda es mayor a 0.5.

Aguas someras: Se considera que el oleaje está en aguas someras, cuando la profundidad relativa o cociente entre la profundidad del agua y la longitud de onda, menor a 1/20. La celeridad de las olas depende solamente de la profundidad.

Altura significativa: Parámetro estadístico representativo del oleaje definido como la media aritmética de las alturas de ola del tercio de las olas mal altas del registro.

Asomeramiento: Cambios que se producen en la propagación del oleaje, debido a la variación de la profundidad. El fenómeno da lugar a cambios en la altura y longitud de onda, pero no en los periodos.

Batimetría: La batimetría es el levantamiento del relieve de las superficies subacuáticas, tanto para el fondo marino, como los de cualquier masa de agua; ríos, lagos, etc.

Calidad del fondo: Indica la naturaleza del fondo cerca de la costa en fondeaderos y bajo fondos.

Carta náutica: Mapa que delinea y demuestra las características de un área específica con sus profundidades y alturas de accidentes geográficos y artificiales.

Cota: Elevación o altitud de una marca de referencia, ya sea convencional o espacial de carácter temporal o permanente.

Difracción: Efecto de cesión lateral de energía que se produce tras la propagación, por un determinado obstáculo. Los efectos que produce la difracción, son cambios sustanciales en las alturas de ola y direcciones de propagación en las inmediaciones de la zona de agua abrigada tras el obstáculo.

Dirección del oleaje: Dirección de donde incide el oleaje, todas las direcciones del oleaje se miden en el sentido de las agujas del reloj.

Interpolación: Obtención de nuevos puntos, a partir del conocimiento de un conjunto discreto de puntos.

Modelo numérico: Representación teórica de un fenómeno natural, expresado en forma matemática, que permite una mejor comprensión y estudio de su comportamiento.

Línea de costa: Todo el contorno de la costa, con su forma, orientación, aspecto y características (alta, escarpada, rocosa, de arena, etc.).

Oleaje: Fenómeno determinado por la acción del viento en cualquier superficie libre de agua, las cuales condicionan el tipo de ola que será inducida.

Profundidad relativa: Cuociente entre la profundidad y la longitud de onda.

Propagación: Metodología que consiste en representar la variación de altura, periodo y dirección de oleaje durante la trayectoria que este posee desde aguas profundas hasta aguas someras.

Reflexión: Efecto que se produce cuando una onda se refleja con algún obstáculo y no se alcanza a disipar toda su energía, produciéndose un cambio de dirección de la onda y su variación de altura.

Refracción: Proceso de transformación del oleaje que consiste en cambios en las alturas de ola y dirección de propagación. El fenómeno se produce en aguas someras e intermedias, y es causado principalmente por la batimetría.

Sonda: Profundidad obtenida en la operación de sondaje, que se lee desde una carta náutica.

Sondaje: Operación para obtener el relieve submarino mediante elementos mecánicos o acústicos.

Veriles: Líneas que unen los puntos de igual profundidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de oleaje requieren necesariamente de información batimétrica, la cual varía tanto en el método de obtención, nivel de precisión, densidad de puntos, extensión en planta, accesibilidad y costos. Como práctica generalizada, en etapas tempranas de un proyecto se recurre a información topobatimétrica existente o bien proveniente, de fuentes de acceso gratuito o de bajo costo. En etapas más avanzadas del estudio, se hace necesario mejorar la información topobatimétrica mediante las mediciones de campo, actividad denominada generalmente como levantamiento de detalle. Algunos de los factores más relevantes que inciden en la definición de la densidad y extensión del levantamiento de detalle son: el tipo y objetivo del proyecto, los recursos económicos disponibles, la ubicación y la disponibilidad de infraestructura logística y portuaria. Sin embargo, desde el punto de vista técnico, no se utilizan herramientas prácticas que permitan sistematizar la definición óptima de la resolución espacial, nivel de precisión, ni del área que se debe cubrir con el levantamiento de detalle, quedando a criterio de los encargados de cada proyecto.

En el estudio desarrollado por (Plant et al, 2008) se constata que la predicción de alturas de oleaje muestra una importante sensibilidad al grado de resolución batimétrica, a lo largo del eje perpendicular a la línea de costa. Por otra parte, los resultados en la estimación de la altura de oleaje a lo largo de la línea de costa, son estables y no varían significativamente respecto de la discretización espacial en este eje. En el mismo estudio, se infiere que las olas sienten una versión filtrada de la batimetría real.

En el marco del proyecto denominado “Undimotriz”, el presente trabajo pretende sensibilizar respecto de la resolución de la batimetría y su efecto en un modelo numérico de propagación espectral de oleaje, utilizado para la estimación de los parámetros espectrales en sectores costeros. Los análisis de sensibilidad se efectúan principalmente a lo largo del eje transversal a la costa, ya que, de acuerdo a (Plant et al, 2009), es donde ocurren los cambios más significativos en las predicciones de oleaje. Cabe mencionar, que los trabajos de modelación numérica son efectuados en dependencias del Instituto Nacional de Hidráulica (INH), en donde se cuenta con la licencia comercial del software MIKE 21 SW (FM), seleccionado para realizar la propagación del oleaje. La información de campo base para desarrollar este estudio fue levantada en el marco del proyecto Undimotriz.

2. OBJETIVOS Y ALCANCES

El objetivo general del proyecto de título es cuantificar la sensibilidad de los resultados de un modelo de propagación espectral de oleaje desde aguas profundas, en función de la extensión de los levantamientos batimétricos disponibles en dos zonas de estudio, Curaumilla y Lebu.

Se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Implementar y calibrar un modelo de propagación de oleaje para ambas zonas de estudio, mediante el software MIKE 21 SW (FM), que permita sensibilizar los estadígrafos del oleaje modelados, respecto a distintas condiciones de batimetría de entrada.
- Generar cinco escenarios batimétricos de distinta extensión en el eje perpendicular a la línea de costa, en función de distintas combinaciones de fuentes de información batimétrica disponible; global, cartas náuticas y de detalle. Estos escenarios se diferencian entre sí, fundamentalmente, en la extensión de la batimetría de detalle considerada para la representación de la superficie batimétrica.
- Evaluar el comportamiento y la variabilidad de los estadígrafos del oleaje (altura significativa, período medio y dirección media), obtenidos de las modelaciones de escenarios batimétricos, mediante comparación en algunos puntos definidos en la región batimétrica con información de detalle.

Las limitaciones o alcances del presente trabajo que se resumen a continuación:

- En el modelo no se incluye el viento ni las corrientes como forzantes de oleaje local.
- Los resultados cuantitativos que representan la sensibilidad y variabilidad de los modelos realizados no deben ser extrapolados para otras zonas de estudio.

- Para la propagación del oleaje espectral desde aguas profundas, se impone una condición de borde uniforme en el límite occidental de cada modelo, utilizando los espectros medidos en aguas intermedias por boyas Triaxys, fondeadas a una profundidad aproximada de 150 [m], para ambas localidades.
- Los modelos numéricos implementados en cada localidad, son calibrados a partir de los parámetros espectrales obtenidos en terreno mediante ADCP.
- La batimetría de detalle a utilizar para la caracterización del fondo marino, es proporcionada por el INH y fue obtenida a través de mediciones de terreno.

3. MARCO TEÓRICO

En la presente sección, se introducen los conceptos básicos utilizados en el presente proyecto.

3.1 TEORÍA DEL OLAJE

El oleaje es el principal agente climático causante de la dinámica litoral. Éste es generado por el viento que produce una transmisión de energía del aire al agua, dando lugar a la formación de olas que se propaga en todas las direcciones.

El oleaje generado por el viento, denominado Sea, es un oleaje relativamente caótico, que se caracteriza por tener olas cortas y asimétricas, diferentes direcciones de propagación y poca correlación entre periodos y alturas. A medida que el oleaje se propaga hacia la costa es posible observar que las componentes de mayor periodo se alejan de las de menor periodo, debido a la dispersión de frecuencia, generándose además transferencias no lineales producto de la interacción ola ola, la que se puede apreciar como un aumento de las frecuencias bajas. Producto de ello, el oleaje se vuelve mayormente ordenado (las alturas y periodos son relativamente similares), y el es denominado mar de fondo o Swell. La disipación de energía del oleaje tipo Swell, se produce por (Whitcapping, disipación turbulenta, fricción de fondo en aguas intermedias y rotura). En la Figura 3-1 se muestra gráficamente, el desarrollo del oleaje, desde su periodo de generación hasta el rompimiento.

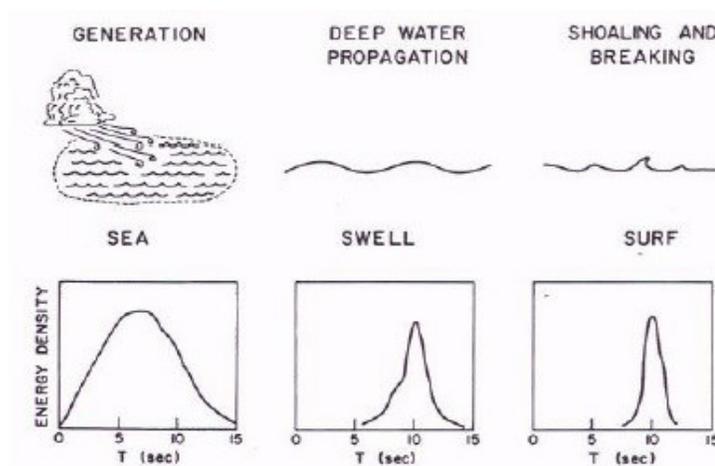


Figura 3-1 Desarrollo del oleaje. Fuente: (Komar, 1998).

3.1.1 CARACTERIZACIÓN ESTADÍSTICA DE OLAJE

Para medir el oleaje se utilizan instrumentos de medición de varios tipos (boyas, ADCP, radar, satélite o sensor de precisión). En particular para este estudio se considera una boya ubicada en aguas intermedias y un ADCP en aguas someras. El resultado de una medición de oleaje, en términos simples, se puede representar por una serie de tiempo con la elevación de la superficie libre en una posición horizontal (Holthuijsen, 2007), como se observa en la Figura 3-2.

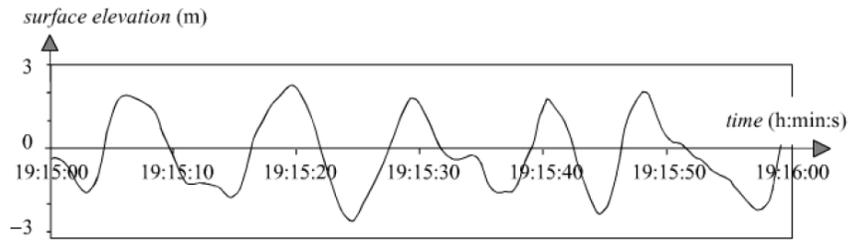


Figura 3-2 Ejemplo de una medición de oleaje. Fuente: (Holthuijsen, 2007).

A partir de este registro es posible identificar olas individuales. De cada ola es posible obtener la altura H_0 , periodo T_0 y la dirección de la ola. Dentro de los parámetros representativos de un registro, se encuentra la altura de ola significativa $H^{1/3}$, que se define como la media del tercio de olas de mayor altura (Goda, 2000), tal como se observa en la Figura 3-3.

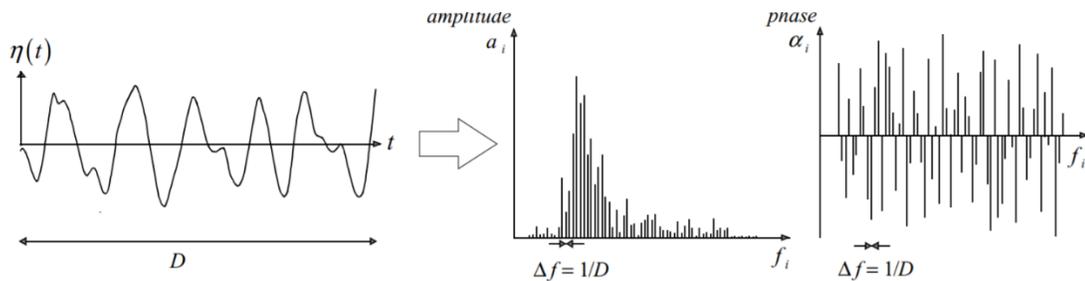


Figura 3-3 Resultado de transformar un registro en los espectros de amplitud y fase. Fuente: (Holthuijsen, 2007).

3.1.2 DEFINICIÓN DE ESTADO DE MAR

El estado de mar representa cada una de las posiciones del oleaje, admitiendo que éstas tienen una variación lo suficientemente corta para considerar el proceso como estacionario y ergódico (Silva, 2005). El oleaje se puede conformar por dos tipos de variaciones.

- Variación de periodo corto: La variación es muy rápida, del orden de segundos, durante la cual el proceso se considera estacionario.
- Variación de periodo largo: La variación es lenta, del orden de horas, y en ella evoluciona el estado de mar, por lo que hay variación de estado.

En la práctica, para tener muestras estadísticamente representativas de la superficie libre, se debe fijar un periodo de medición que sea, por un lado, lo suficientemente corto para admitir la hipótesis de estacionalidad, y por otro, lo suficientemente largo para que la muestra tenga un número representativo de olas (Silva, 2005). Idealmente los registros deben tener una extensión de al menos 15 a 30 minutos (Holthuijsen, 2007), pero en la práctica los estados de mar son representativos de series entre 1 y 6 horas.

Una vez obtenido el registro, es posible considerar dos tipos de descripciones del estado de mar: una es la estadística temporal del estado de mar, en la cual es posible estimar parámetros, propiedades estadísticas y distribuciones de la serie de tiempo obtenida; otro método es la descripción espectral del estado de mar, en la cual se estudia directamente el espectro de energía junto con sus propiedades en el dominio de la frecuencia (Silva, 2005).

3.1.3 DEFINICIÓN ESPECTRAL DEL OLAJE

El espectro de oleaje corresponde a la distribución de energía de una sucesión de armónicos que representan la desnivelación instantánea del estado de mar. De esta forma la dirección y la frecuencia del oleaje definen un espectro de oleaje direccional (Araya, 2016). La serie de armónicos se muestra en la siguiente ecuación.

$$\eta(t) = \sum a_j \cos(\omega_j t - \phi_j)$$

Ecuación 1

Donde;

a_j : Amplitud en componente j.

ω_j : Frecuencia de componente j.

ϕ_j : Desfase de componente j.

El espectro es una de las formas más completas y habituales de describir las propiedades del oleaje irregular. Éste caracteriza la energía, la frecuencia y la dirección de propagación, y describe como la energía se reparte sobre un rango de frecuencias y direcciones. La distribución de energía (m^2/H_z) en el dominio de frecuencias se representa por el espectro de frecuencias, mientras que la distribución de la energía en el fondo de la dirección se representa en función de la dispersión direccional (G.I.O.C, 2000a).

De un registro de oleaje se puede obtener el espectro o función de densidad espectral $S(f)$, donde (f) es la frecuencia angular, aplicando una transformada rápida de Fourier. A partir del espectro se puede obtener la energía media por unidad de superficie, contenida en cada una de las frecuencias del registro. El espectro está determinado por la frecuencia del largo de la duración y la tasa de adquisiciones de datos.

La energía del espectro se define por la Ecuación 2.

$$\int_0^{\infty} S(f)df$$

Ecuación 2

Existen dos tipos de espectros: i) los denominados de una dimensión (1D) o espectros de frecuencia, que resumen en una dirección promedio la incidencia del oleaje en la zona y ii) los (2D) o bidimensionales, que representan la energía para cada frecuencia y dirección de aproximación al punto de medición. En la Figura 3-4 y Figura 3-5, se muestra en ejemplo de espectros (1D) y (2D) respectivamente.

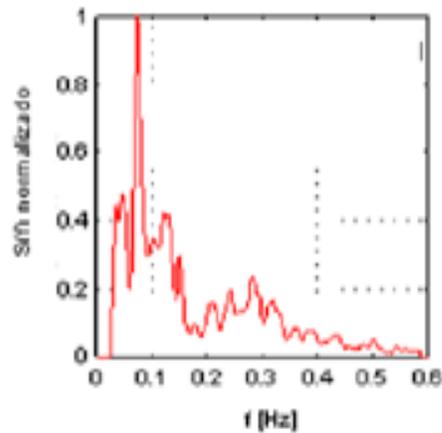
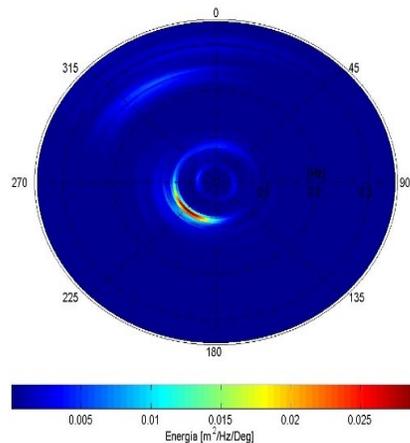


Figura 3-4 Ejemplo de espectro 1(D). Fuente: (INH, 2014).



Z

Figura 3-5 Ejemplo de espectro 2(D) de boya Triaxys fecha 06-05-12 07:00. Fuente: Elaboración propia

3.1.4 TEORÍA LINEAL DE OLAJE

La teoría lineal del oleaje, también conocida como teoría de oleaje de Airy supone que las olas no interactúan cuando se propagan. Cada componente del estado de mar viaja de forma independiente. El mayor requisito para que este supuesto se cumpla es que (1) la amplitud de la ola debe ser pequeña comparada con su largo de onda y (2) la amplitud debe ser pequeña comparada con la profundidad (Dean & Dalrymple, 1991).

De la teoría lineal, se desprende la siguiente ecuación de celeridad.

$$c = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}$$

Ecuación 3

Donde;

L : Longitud de onda.

T : Periodo.

k : Número de onda, que es igual a $\frac{2\pi}{L}$.

h : Profundidad.

h/L : Profundidad relativa.

g : Aceleración de gravedad.

En zonas donde la profundidad relativa (h/L) es mayor que $\frac{1}{2}$, se denomina condición de aguas profundas, donde las olas se propagan sin ser influenciadas por el fondo marino. En esta condición la celeridad de la ola se calcula según la Ecuación 4.

$$C = \frac{g}{2\pi} T$$

Ecuación 4

Para calcular la longitud de onda en aguas profundas, asociada al periodo de la ola, se resuelve la Ecuación 5.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}$$

Ecuación 5

Una vez que las olas llegan a zonas menos profundas, comienzan a sentir el fondo, y por consecuencia se inician los siguientes fenómenos físicos:

a) Asomeramiento

En esta transformación la longitud de onda y celeridad disminuyen de forma progresiva, sin embargo, la altura de la ola aumenta, debido a la variación existente en la profundidad (Holthuijsen, 2007).

b) Difracción

La difracción se relaciona con la no uniformidad de la altura de ola del tren de ondas que se propaga hacia la costa. Esta uniformidad varía en presencia de algún obstáculo, generando así transferencia lateral de energía (G.I.O.C, 2000a).

c) Refracción

La refracción se relaciona con la variación en la dirección del tren de olas, que se produce por la disminución de la profundidad. Este cambio genera que el oleaje tienda a alinearse de forma paralela a los veriles o isobatas (Silva, 2005).

d) Reflexión

La reflexión corresponde al fenómeno producido por algún obstáculo o barrera que dificulte la propagación del oleaje. Al ocurrir esta acción la ola puede reflejar energía y la cantidad reflejada tendrá estricta relación con la pendiente del obstáculo (Goda, 2000).

3.2 DESCRIPCIÓN MODELO MIKE 21 SW

Para establecer las condiciones de oleaje reinante y dominante en las zonas de interés se ocupa el modelo de última generación MIKE 21 SW, que se basa en la técnica de los volúmenes finitos. El método se basa en el uso de mallas flexibles, con elementos lineales triangulares. Este tipo de malla es particularmente útil para la modelación de grandes áreas complejas que, al mismo tiempo, requieren una resolución detallada en sitios.

El módulo está basado en la ecuación de acción de onda, y corresponde a una tercera generación de modelos espectrales de oleaje. Estos simulan el crecimiento, disminución y la transformación del oleaje, así como la propagación del mismo.

MIKE 21 SW es una excelente herramienta para la predicción y análisis de clima de olas en aguas profundas y áreas costeras. Dentro del módulo, existen dos tipos de formulaciones espectrales que simulan los fenómenos mencionados:

- i. Formulación Paramétrica Desacoplada Direccional
- ii. Formulación Espectral

En el presente estudio se utiliza la formulación espectral para la implementación de los modelos utilizados. Esta se basa en la ecuación de balance del oleaje (Komen, 1994) y (Young, 1999), donde el espectro del oleaje, tanto en dirección y frecuencia, es una variable dependiente.

La ecuación que gobierna Mike 21 es la ecuación de la acción de las olas, mostrada en la Ecuación 6.

$$N = \frac{E}{f}$$

Ecuación 6

Donde;

E : Energía

f : Frecuencia angular

En coordenadas cartesianas, la ecuación de conservación para la acción de las olas es la siguiente, (DHI, 2012).

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla * (\bar{v}N) = \frac{S}{f}$$

Ecuación 7

Donde;

$N(\bar{x}, f, \theta, t)$ es la acción del oleaje.

t : Tiempo.

\bar{x} : (x, y) son las coordenadas cartesianas.

\bar{v} : $(c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ es la velocidad de propagación de un grupo de ondas en las dimensiones, \bar{x}, f, θ .

∇ es el operador vectorial equivalente a la divergencia de la cuarta dimensión en \bar{x}, f, θ – *espacio*.

S es el término que representa el cambio local de energía en el volumen de control

La velocidad de propagación característica, viene dada por las relaciones cinemáticas lineales.

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{f}{k} + \bar{U}$$

$$c_f = \frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \nabla_{\bar{x}} d \right] - c_g \bar{k} \frac{\partial U}{\partial s}$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial f}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right]$$

Ecuación 8

Donde;

s es la coordenada espacial en dirección de onda θ y m la coordenada perpendicular a s .

$\nabla_{\bar{x}}$ es el operador diferencial en dos dimensiones en \bar{x} espacio.

MIKE 21 SW incluye los siguientes fenómenos físicos:

- I. Interacción no lineal ola – ola (Cuadrupletos y triadas).
- II. Disipación debida al whitecapping.
- III. Disipación debido al rompimiento de ola por profundidad.
- IV. Disipación debida a la fricción de fondo.

La discretización de las ecuaciones que gobiernan el oleaje en el espacio y en el espectro es ejecutada usando el método de volúmenes finitos, centrado en la celda. El tiempo es integrado usando un paso de tiempo aproximado el método explícito multi-secuencial.

A continuación, se describe cada uno de los fenómenos físicos considerados.

- I. Interacción no lineal ola–ola: La transferencia de energía no lineal entre los diferentes componentes de un espectro, juega un papel crucial para la evolución temporal y espacial de un campo de ondas. En este ítem es posible incluir o no la interacción de olas cuadrupletos y triadas. La interacción de las olas cuadrupletos se describe por el método Discrete Interaction Approximate (DIA) (Komen, 1994) y el proceso de intercambio de energía de las olas triadas se modelan utilizando el método simplificado por (Eldeberky and Battjes, 1995, 1996).

- I. Disipación debida al white-capping: Esta disipación es controlada principalmente por la pendiente de las olas. La formulación utilizada por el modelo, se basa en la ecuación modificada por varios autores, como (Hasselmann, 1974) entre otros.
- II. Disipación debido al rotura de ola por profundidad: El rompimiento inducido por profundidad es el proceso mediante el cual las olas alcanzan un límite en la razón altura de ola y profundidad. La formulación utilizada en el módulo se basa en la formulación de (Battjes y Janssen, 1978).
- III. Disipación debida a la fricción de fondo: A medida que las olas se propagan a aguas someras, la velocidad orbital se vuelve importante. Para la formulación espectral utilizada, la función de disipación de fondo se basa en la teoría lineal (DHI, 2012).

3.3 PARÁMETROS ESPECTRALES

A partir de los datos espectrales $S(f, \theta)$ es posible calcular los parámetros espectrales del oleaje. A continuación, se detallan los parámetros considerados.

La altura significativa espectral H_{m0} se obtiene en base a la integración del espectro direccional, asumiendo que la función de densidad espectral se acerca a una distribución de tipo Rayleigh (Holthuijsen, 2007).

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

Ecuación 9

Donde m_0 corresponde al momento de orden 0 del espectro direccional $S(f, \theta)$. El momento de orden n del espectro direccional es calculado como:

$$m_m = \int \int f^n S(f, \theta) df d\theta$$

Ecuación 10

Donde;

f : Corresponde a la frecuencia.

θ : Corresponde a la dirección.

n : Corresponde al orden del momento calculado.

Como periodo característico se considera el periodo medio espectral del oleaje T_m , el cual se define con la siguiente ecuación.

$$T_m = \frac{m_0}{m_1}$$

Ecuación 11

Para efectos de cálculo se utiliza la dirección media del oleaje $\bar{\theta}$. (DHI, 2012).

$$\bar{\theta} = 270 - \tanh^{-1}(b/a)$$

Ecuación 12

Donde;

$$a = \frac{1}{m_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) E(f, \theta) df d\theta$$

$$b = \frac{1}{m_o} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \text{sen}\left(\frac{3}{2}\pi - \theta\right) E(f, \theta) df d\theta$$

3.4 MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN DE SONDAJES

En topobatimetría, es común contar con un conjunto de valores discretos para representar una superficie continua. Sin embargo, en ocasiones se requiere tener información entre dichos valores. Es por eso que se recurre a los métodos de interpolación, que permiten calcular el valor de una variable y su posición a partir de valores muestreados de la misma variable en otras posiciones del espacio. Para efectos de este estudio, se utilizan tres métodos, que se describen a continuación.

3.4.1 MÉTODO KRIGING

Este método de interpolación define la altitud como una variable regionalizada, suponiendo que funciones de correlación espacial, explican, en su totalidad o parcialmente su variación espacial (Giraldo-Henao, 2003). La variable Z que se representa a través de funciones homogéneas deducidas de toda el área de análisis, es la profundidad. Estas funciones son derivadas teniendo en cuenta la distancia Z que existe entre los datos medidos a través de la semi varianza, analizando así la correlación espacial entre ellos en función de Z y estimando una media ponderada.

$$\hat{Z}_{X,Y} = \sum_{i=1}^k \tau_i \cdot Z_j$$

Ecuación 13

Donde;

k : Corresponde a los datos que se sitúan en torno del punto interpolado.

τ_i : Representa la ponderación a cada uno de ellos.

3.4.2 TRIANGULACIÓN CON INTERPOLACIÓN LINEAL

El método consiste en un algoritmo que crea triángulos dibujando líneas entre los puntos con información. Los puntos originales son conectados de forma tal que los lados del triángulo no se interceptan con otros. El resultado es un mosaico de caras triangulares sobre toda la malla. Este método respeta el criterio de interpolación exacta, que dice que el resultado debe ser tal que para los puntos medidos se respete el valor observado. Cada triángulo define un plano sobre los nodos de la malla, con la inclinación y elevación determinada por los tres puntos de datos originales en la definición del mismo. Todos los nodos de la malla dentro de un triángulo son definidos por la superficie triangular.

3.4.3 VECINO MÁS CERCANO

Este método asigna a cada nodo el valor de la observación más cercana, obteniendo una malla denominada diagrama de Voroni. Si los datos están desigualmente espaciados, pero con una alta densidad, se obtiene un terreno escalonado (Menéndez, 2009). La ecuación del método de interpolación, es la descrita a continuación.

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f(x_i, y_i)$$

Ecuación 14

Donde;

$Z(x, y)$ es la estimación en (x, y) .

w_i : Corresponde a los porcentajes.

$f(x_i, y_i)$: Corresponde a los datos conocidos de (x_i, y_i) .

3.5 PARÁMETROS DE ERROR

Para evaluar el comportamiento y variabilidad del modelo en la predicción de los estadígrafos de altura significativa, período medio y dirección media, se definen tres índices; Sesgo, error cuadrático medio (RMSE) y diferencia porcentual, para calcular el error. Estos estadígrafos son obtenidos mediante las siguientes relaciones

Sesgo

$$Sesgo = \left(\frac{1}{N} \sum X_i \right) = \bar{Y}_i - \bar{X}_i$$

Ecuación 15

RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{n\bar{X}^2}}$$

Ecuación 16

Diferencia Porcentual

$$Dif \% = \frac{1}{N} \sum \frac{Y_i - X_i}{X_i} 100$$

Ecuación 17

Donde;

X_i : Corresponde al i-ésimo dato medido por el instrumento.

Y_i : Corresponde al i-ésimo dato generado por el modelo.

4. METODOLOGÍA

En este capítulo se incluye una breve descripción de los criterios utilizados para seleccionar las zonas de estudio. A continuación, se señalan los antecedentes utilizados para la creación del modelo numérico, específicamente en cuanto a los valores de entrada de la batimetría y los datos de oleaje. Finalmente se presenta la metodología utilizada para definir la influencia de la batimetría local en la modelación de propagación de oleaje mediante Mike 21 SW.

4.1 ZONAS DE ESTUDIO

La investigación comprende a la zona de Curaumilla, y Lebu pertenecientes a la región de Valparaíso y BioBío, respectivamente, tal como se indica en la Figura 4-1.

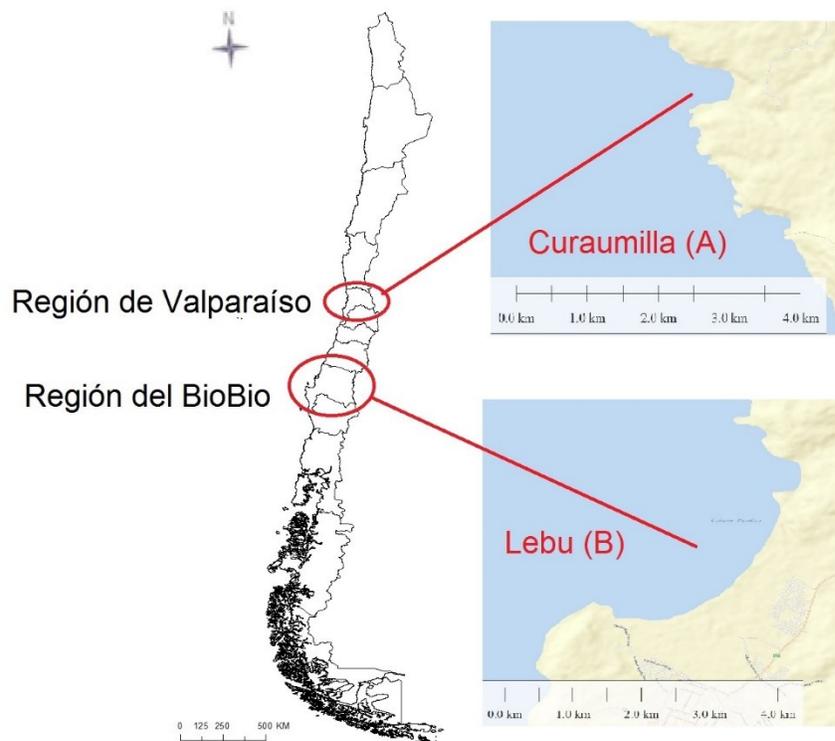


Figura 4-1 Zonas de estudio, Curaumilla (A) y Lebu (B). Fuente: Elaboración Propia.

Se eligen ambas localidades, fundamentalmente porque se dispone de datos de oleaje, tanto en aguas profundas como en aguas someras, junto con batimetría de detalle en las bahías.

Otro aspecto importante es que estas localidades presentan condiciones particulares en cuanto a sus características físicas, como el perfil de playa representativo, o bien la orientación, área y longitud de la bahía. En el caso Curaumilla, la bahía tiene un ancho de 1.2 [km] y se orienta hacia el Oeste (W), en cambio, la bahía de Lebu es un 80 % más ancha y su orientación es hacia el Noroeste (NW). De esta forma, al seleccionar ambas zonas, se busca evaluar la variación de los resultados de la propagación espectral del oleaje, en sectores con distintas características morfológicas.

4.2 ANTECEDENTES

Los antecedentes utilizados para la ejecución de este proyecto son principalmente las fuentes batimétricas existentes para las zonas de estudio, y los datos de oleaje en aguas profundas y someras obtenidos por los instrumentos de medición. A continuación, se detallan los antecedentes mencionados.

4.2.1 BATIMETRÍA

La batimetría se define como el arte de medir las profundidades (RAE, 2016). Dicho de otra forma, la batimetría es el levantamiento del relieve de las superficies subacuáticas, tanto para el fondo marino, como los de cualquier masa de agua; ríos, lagos, estuarios, etc.

Como resultado de un levantamiento topobatimétrico, se adquiere una serie de puntos discretos, los cuales pueden ser obtenidos a través de las sondas monohaz, multihaz o sonar de barrido lateral, entre otros.

En la presente investigación se utilizan fuentes de información batimétrica con diferente resolución, cobertura, disponibilidad y costos. Las fuentes empleadas para la construcción de los escenarios batimétricos son:

- I. Sondajes GEBCO.
- II. Sondajes ETOPO.
- III. Sondajes SHOA.
- IV. Sondajes de detalle en zonas de estudio.

Las dos primeras (I y II), son de libre acceso y tienen cobertura topográfica y batimétrica a escala mundial. La denominación GEBCO corresponde a una sigla en inglés, cuya traducción al español es Carta Batimétrica General de los Océanos. GEBCO es una grilla continua de datos de modelos de terreno a nivel mundial, que se genera a partir de la combinación de los sondeos de precisión, controlada por embarcaciones especializadas en mediciones (GEBCO, 2017).

ETOPO es un modelo de relieve global creado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos NGDC. El modelo se genera a partir de diversas bases de datos digitales globales y regionales del relieve marino y de tierra (NOAA, 2017)

Ambas fuentes tienen resolución espacial constante en todo su dominio. Para el caso de GEBCO la resolución es de 0.5° o 0.9 [km] (GEBCO, 2017), en cambio para ETOPO es de 1° o 1.8 [km] (NOAA, 2017).

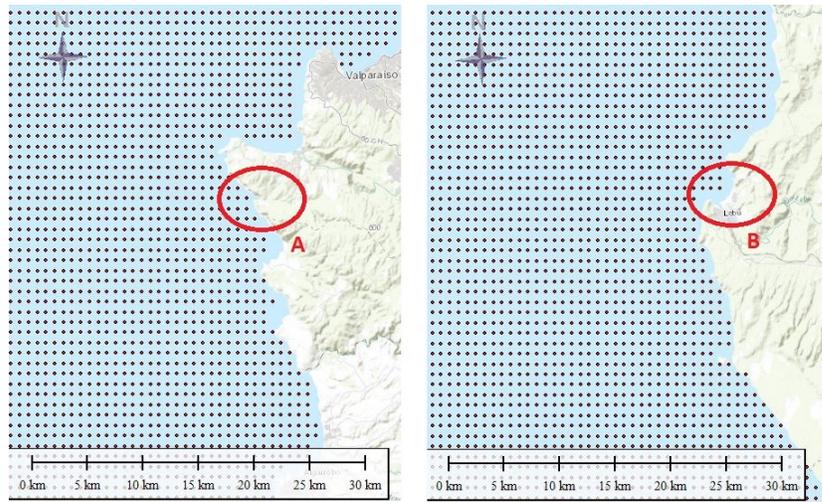
Por otro lado, los sondajes del SHOA y de detalle (III y IV) son bases de datos comerciales. La resolución espacial de los sondajes del SHOA, a diferencia de los de detalle, no es constante, ya que en todas sus cartas batimétricas existentes se considera un espaciamiento diferente. Esto se debe principalmente, a que la institución tiene como objetivo, la entrega de información náutica para la navegación en las vías fluviales y lacustres, aguas interiores, mar territorial y en la alta mar contigua al litoral del país (SHOA, 2017)

En la Tabla 4-1, se indican las cartas náuticas del SHOA, consideradas en ambas zonas de estudio para el presente proyecto.

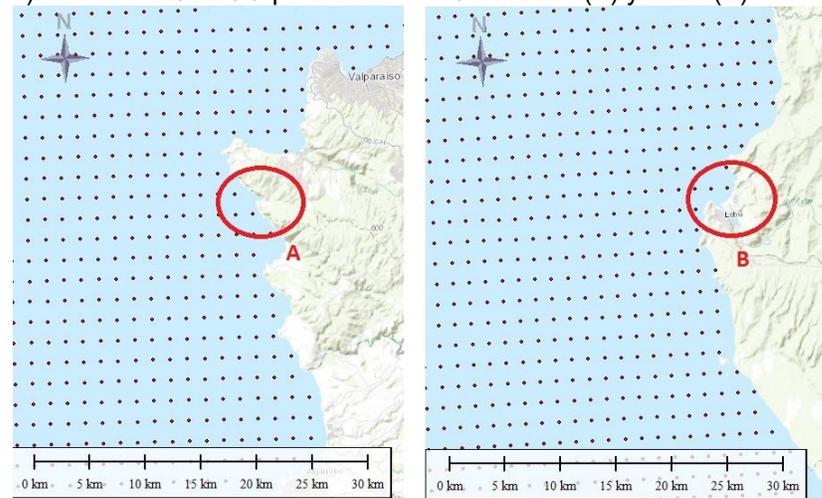
Zona de estudio	Nombre carta náutica	Código carta náutica
Curaumilla	Pascua- Navegación Insular	CL1P2002
	Bahía Valparaíso a Golfo de Arauco	CL2VA050
	Bahía Coquimbo a Bahía Valparaíso	CL2CO040
	Bahía Quintero a Bahía Valparaíso	CL4VA010
	Bahía Concón	CL5VA010
	Club de Yates Viña del Mar	CL6VA010
	Rada de Arica a Caleta Matanza	CL10006
	Bahía y Puerto Valparaíso	CL5VA015
	Aproximación a Puerto San Antonio	CL5VA020
	Puerto San Antonio	CL5VA021
	Lebu	Golfo de Arauco a Bahía Corral
Golfo Arauco		CL3BB020
Puerto Lebu		CL5BB030
Puerto Yana		CL5BB035
Punta Lengua de Vaca a Isla Guafo		CL100007

Tabla 4-1 Cartas Náuticas del SHOA. Fuente: Elaboración Propia.

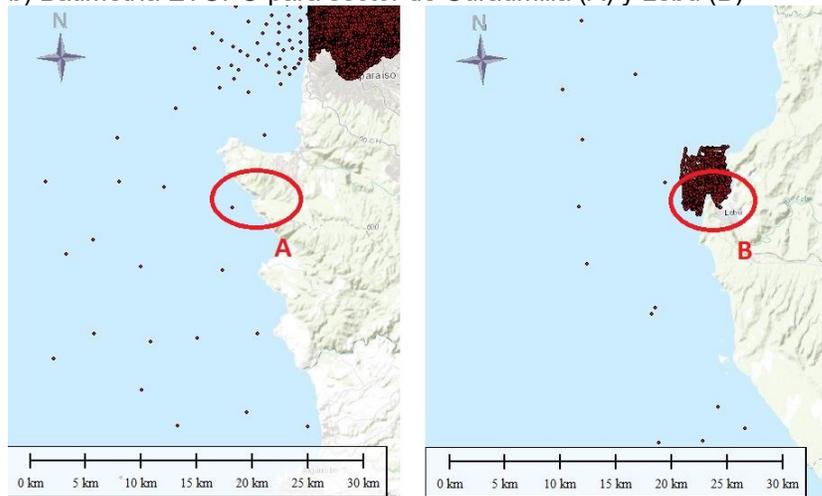
En la Figura 4-2 se aprecia la densidad y distribución de los sondajes de GEBCO, ETOPO Y SHOA para las zonas de estudio Curaumilla (A) y Lebu (B).



a) Batimetría GEBCO para sector de Curaumilla (A) y Lebu (B)



b) Batimetría ETOPO para sector de Curaumilla (A) y Lebu (B)



c) Batimetría SHOA para sector de Curaumilla (A) y Lebu (B).

Figura 4-2 Batimetría a) GEBCO , b) ETOPO y c) SHOA para Curaumilla (A) y Lebu (B).

Los sondajes de detalle en las zonas de estudio, fueron obtenidos mediante mediciones de terreno, realizadas en el marco del proyecto Undimotriz. Los sondajes de precisión utilizados fueron medidos con un intervalo de 10 [s], por un Ecosonda Syqwest modelo Hydrobox de 200-33 [KHz] digital de alta precisión. El instrumento mostrado en la Figura 4-3, es capaz de obtener profundidades entre los centímetros hasta los 100 [m].



Figura 4-3 Ecosonda Syqwest modelo Hydrobox de 200-33KHz.

Para ambas zonas se realizaron sondajes entre 15 y 100 [m] de profundidad, en el año 2012. Estas fueron realizadas siguiendo transectos paralelos, distanciados cada 200 [m], con una distancia entre sondajes de 50 [m] aproximadamente. En la Figura 4-4 se muestra la distribución espacial de las líneas de sondajes batimétricos para las zonas de Curaumilla y Lebu, cubriendo un área 17 [km²] y de 12 [km²], respectivamente.

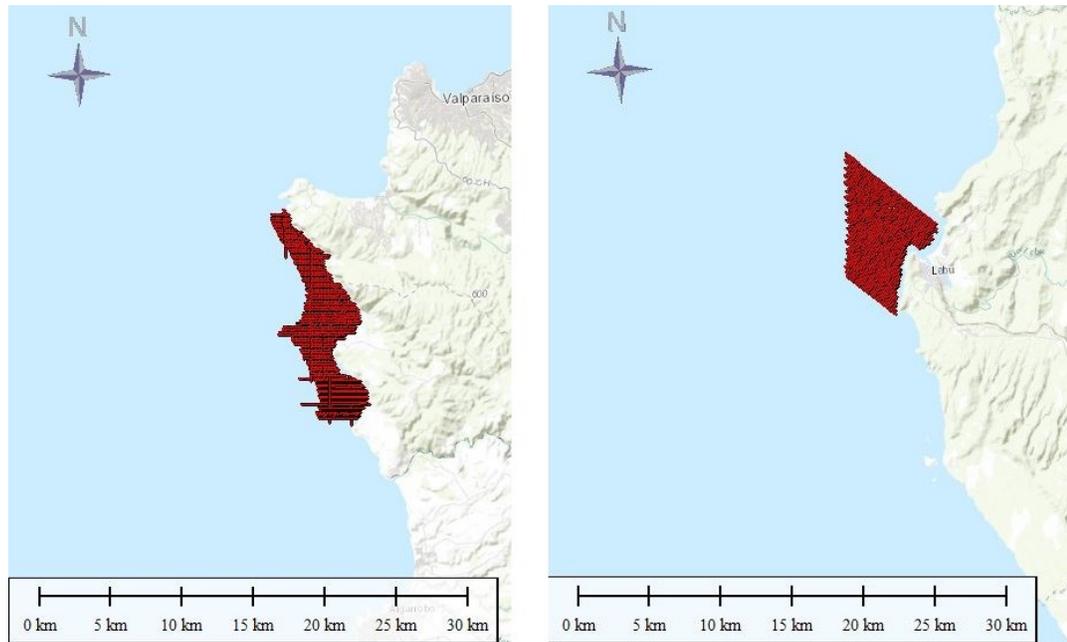


Figura 4-4 Líneas de sondajes batimétricos en Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 4-2 se muestran los límites superior e inferior correspondientes a cada una de las batimetrías de detalle.

Sector Batimétrico	Limite Superior		Limite Inferior	
	Latitud [S]	Longitud [O]	Latitud [S]	Longitud [O]
Curaumilla	33° 06' 00"	71° 45' 00"	33° 14' 00"	71° 40' 00"
Lebu	37° 31' 00"	73° 43' 00"	37° 37' 00"	73° 38' 00"

Tabla 4-2 Límites correspondientes a los sondajes de detalle, Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2 DATOS DE OLAJE

Los datos de oleaje utilizados en el presente proyecto, fueron obtenidos en el marco del proyecto Undimotriz ejecutado, entre los años 2011 y 2013. Las mediciones de oleaje, realizadas de forma simultánea en aguas profundas y someras, se representan mediante espectros de oleaje y parámetros espectrales, para ambas zonas de estudio.

A continuación, se detalla el tipo de instrumento, junto a su posicionamiento geográfico, los tiempos de medición y algunas características generales de la información utilizada.

AGUAS PROFUNDAS

Para obtener mediciones in-situ de oleaje direccional en aguas profundas se adquirieron 2 boyas Triaxys, durante el desarrollo del proyecto Undimotriz. Estas fueron instaladas en 3 localidades, entre las cuales se encuentran Curaumilla y Lebu. En la Figura 4-5 se presenta una fotografía captada durante la faena de instalación de la boya en Curaumilla.



Figura 4-5 Maniobra de instalación de la Boya Triaxys en Curaumilla. Fuente: Proyecto Undimotriz.

El software de procesamiento de datos de oleaje direccional utiliza un algoritmo iterativo, basado en el análisis de la transformada de Fourier. Además mide ángulos y aceleraciones en las 3 direcciones principales, tal como lo muestra la Figura 4-6

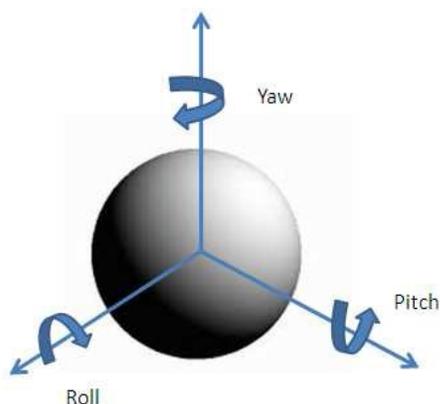


Figura 4-6 Movimientos que afectan a la boya Triaxys.

En la Tabla 4-3 se presenta la posición geográfica, profundidad de fondeo y fechas de medición de todos los registros obtenidos por el proyecto Undimotriz, mientras que en la Figura 4-7 se muestra la posición geográfica de las boyas fondeadas, para ambas zonas de estudio. Cabe destacar, que en los sitios de Curaumilla y Lebu, donde fueron fondeadas las boyas, no fue posible obtener registros de forma continua, debido a diversos factores como las condiciones meteorológicas externas, o incluso corte intencional de las líneas de fondeo, entre otros.

Nombre Boya	Sector	Posición Geográfica		Profundidad de Fondeo [m]	Fechas de Medición
		Latitud [S]	Longitud [O]		
1	Curaumilla	33° 6'7.12"	71°49'32.86"	150	01-08-2011 al 12-12-2013*
2	Lebu	37°35'41.79"	73°45'39.72"	150	01-08-2011 al 26-05-2012*

*Registros no continuos.

Tabla 4-3 Posición geográfica, profundidad de fondeo y fechas de medición de oleaje en aguas profundas, Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

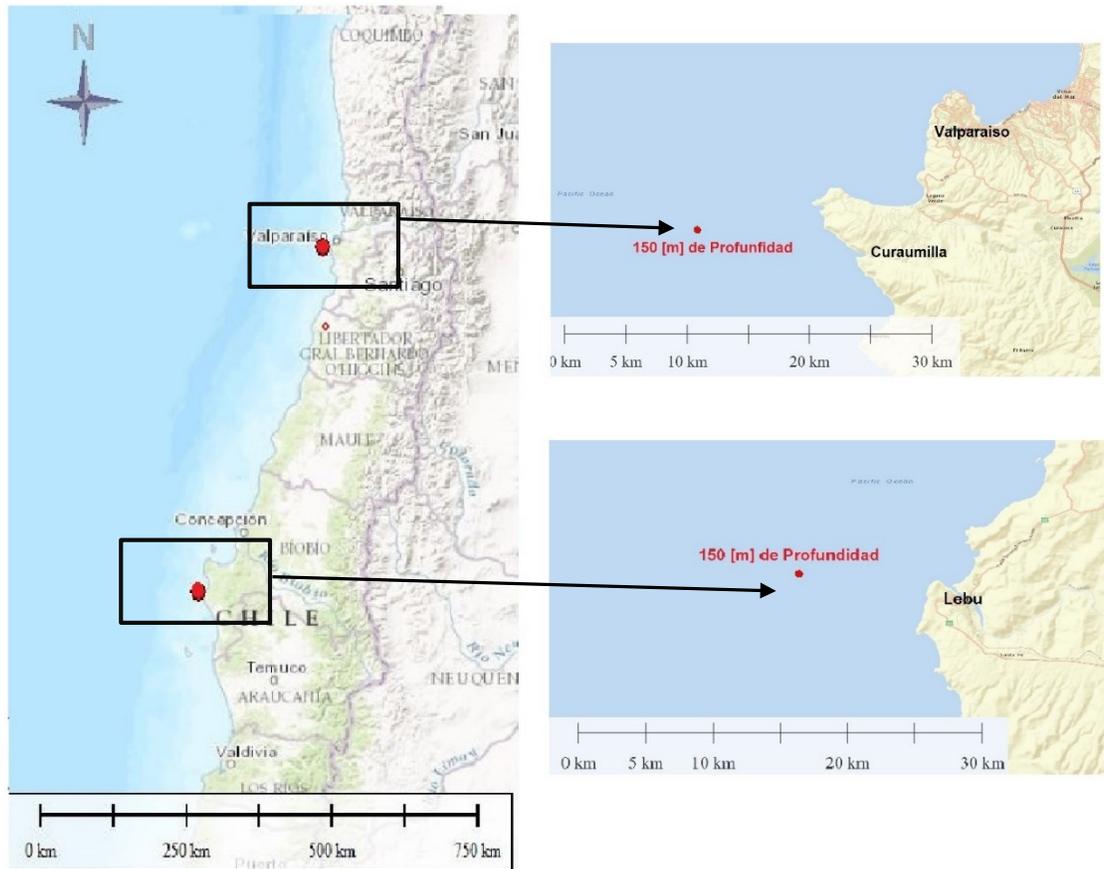


Figura 4-7 Posición geográfica del instrumento de medición de oleaje en aguas profundas, Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

AGUAS SOMERAS

Los datos de oleaje en aguas someras fueron obtenidos mediante un perfilador acústico doppler (ADCP), mostrado en la Figura 4-8. Este es un instrumento que además de medir dirección, periodo y altura del oleaje, puede registrar la velocidad y dirección de las corrientes marinas. Para efectos de este proyecto no son consideradas las corrientes, tal como se indica en los alcances.



Figura 4-8: ADCP RDI Teledyne WHSW600.

El ADCP utilizado para las mediciones, es de extrema precisión y exactitud en aguas someras y se puede fondear hasta una profundidad de 175 [m]. Opcionalmente, permite su ampliación con un sensor de presión, donde se puede operar como monitor de mareas y oleaje direccional. En la Tabla 4-4 se presentan algunas características respecto a todas las mediciones de aguas someras obtenidas por el proyecto Undimotriz, mientras que en la Figura 4-9 se esquematiza la ubicación en planta de los instrumentos fondeados.

Nombre ADCP	Sector	Posición Geográfica		Profundidad de fondeo [m]	Fechas de medición
		Latitud [S]	Longitud [O]		
3	Curaumilla	33° 08' 15.7"	71° 42' 37.3"	20	24-04-2012 al 09-09-2013*
4	Lebu	37° 35' 11"	73° 39' 28"	15	01-09-2011 al 27-05-2012*

*Registros no continuos

Tabla 4-4 Posición geográfica, profundidad de fondeo y fechas de medición de oleaje en aguas someras, Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

En ambas zonas de fondeo, no fue posible obtener mediciones de forma continua, debido a principalmente condiciones meteorológicas.

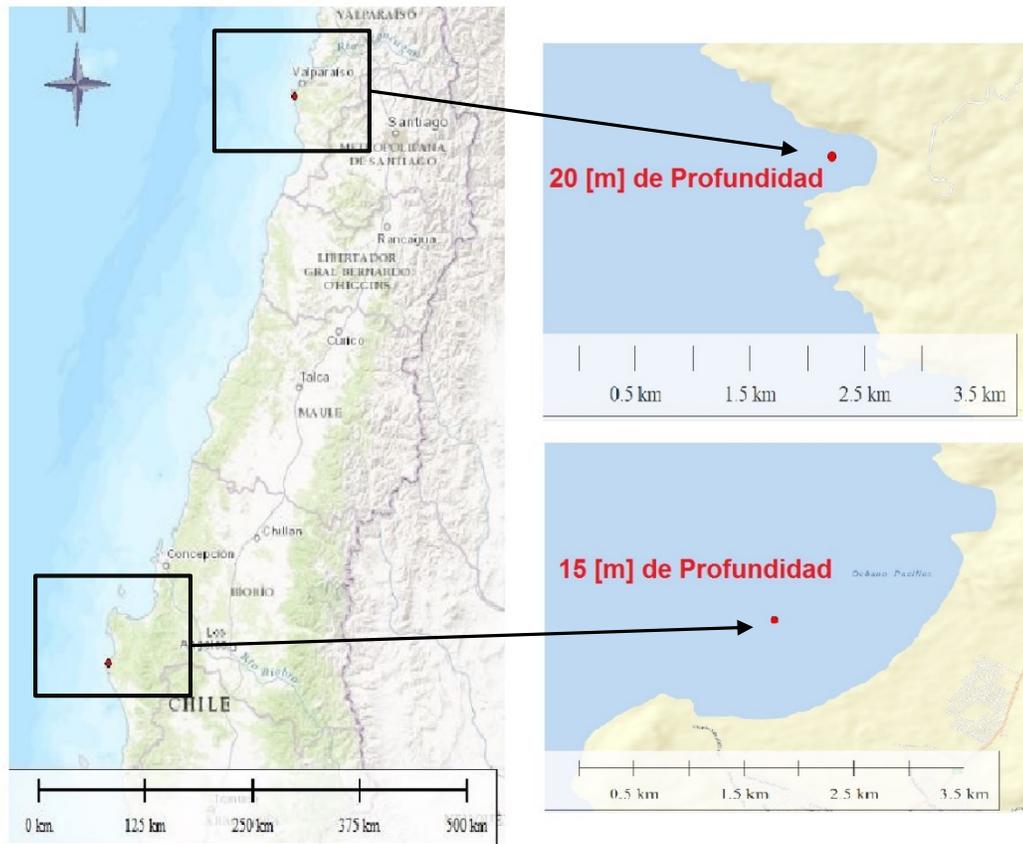


Figura 4-9 Posición geográfica del instrumento de medición de oleaje en aguas someras, Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

4.3 DISEÑO METODOLÓGICO

En esta sección se introducen los procesos involucrados en el desarrollo del presente estudio, describiendo brevemente cada etapa.

1.- Implementar un modelo de propagación de oleaje en software Mike 21, Spectral Wave, en las localidades de Curaumilla y Lebu, utilizando como forzante los datos de oleaje en aguas profundas obtenidos mediante boyas Triaxys.

2.- Sensibilizar la malla de modelación, el método de interpolación de sondajes batimétricos y los parámetros de ajuste del modelo, en función de los resultados del ADCP.

3.- Construir 5 escenarios batimétricos, considerando para cada uno, distintas extensiones de los sondajes del levantamiento de detalle, definidas hasta los veriles -40, -60, -80 y -100. El quinto escenario considera sólo los datos batimétricos de fuente SHOA. El resto del dominio de modelación se complementa con sondajes de fuentes GEBCO y ETOPO.

4.- Para cada escenario, propagar una serie de espectros registrados por la boya, durante 15 días continuos, de manera de obtener parámetros estadísticos del oleaje en puntos donde se cuenta con registros del ADCP.

5.- Realizar un análisis del grado de ajuste de los resultados del modelo de propagación, para cada escenario batimétrico, mediante la evaluación de los parámetros estadísticos de error, (RMSE, sesgo y diferencia porcentual), calculados en relación a los datos registrados con el ADCP.

6.- Representar la variabilidad de los resultados del modelo de propagación para cada escenario batimétrico, a lo largo de perfiles transversales a la línea de costa, mediante la evaluación de la dispersión mínima, promedio y máxima de cada estadígrafo del oleaje, altura significativa (H_{mo}), periodo medio (T_m) y dirección media (D_m). La dispersión es calculada como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo obtenidos de las modelaciones de escenarios batimétricos.

5. CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

En este capítulo se define la configuración de cada una de las variables de entrada del modelo numérico, que logra el mayor ajuste para H_m , T_m y D_m , entre los datos registrados por el ADCP versus los resultados modelados. Por una parte, se detallan los criterios utilizados para definir la extensión del dominio de modelación, y los datos de entrada utilizados como condición de borde occidente del dominio. Posteriormente se realiza un análisis de sensibilidad respecto del grado de resolución de la malla estructurada modelada, el tipo de interpolación batimétrica, y los parámetros de ajuste considerados en la construcción del modelo numérico.

5.1 DOMINIO DE MODELACIÓN

El dominio de modelación se define para ambas localidades mediante mallas con elementos triangulares, en longitudes superiores a 100 [km]. Teniendo en cuenta que el oleaje viene en su mayoría del tercer cuadrante, se define un dominio tal que la bahía de estudio se localice a una menor distancia del borde Norte, que del borde Sur, tal como se muestra en la Figura 5-1 y Figura 5-2, para Curaumilla y Lebu, respectivamente. El límite occidente de modelación se ubica a una distancia perpendicular aproximada de 50 [km] desde cada zona de estudio.

Los vértices que limitan los dominios de ambos modelos, se muestran en Tabla 5-1 y Tabla 5-2, para Curaumilla y Lebu, respectivamente.



Figura 5-1 Dominio de modelación, zona de Curaumilla (A). Fuente: Elaboración propia

Curaumilla	Sector	Vértice	Posición Geográfica	
			Latitud [S]	Longitud [O]
Curaumilla	Norte	Superior derecho	32° 48' 39.2688"	71° 32' 53.9088"
		Superior izquierdo	32° 49' 40.9800"	72° 14' 18.3768"
	Sur	Inferior derecho	33° 52' 18.6505"	71° 49' 36.2227"
		Inferior izquierdo	33° 52' 19.0445"	72° 14' 18.3768"

Tabla 5-1 Vértices extremos del dominio modelación, Curaumilla (A). Fuente: Elaboración propia.



Figura 5-2 Dominio de modelación, zona de Lebu (B). Fuente: Elaboración propia.

Dominio de modelación	Sector	Vértice	Posición Geográfica	
			Latitud [S]	Longitud [O]
Lebu	Norte	Superior derecho	37° 09' 8.8716"	73° 35' 34.3789"
		Superior izquierdo	37° 09' 8.8716"	74° 10' 47.3304"
	Sur	Inferior derecho	38° 36' 1.3895"	73° 30' 17.3496"
		Inferior izquierdo	38° 36' 1.3895"	74° 10' 47.3304"

Tabla 5-2 Vértices extremos del dominio de modelación, Lebu (B). Fuente: Elaboración propia.

5.2 CONDICIÓN DE BORDE

En la caracterización del clima oleaje, es habitual la reducción hacia parámetros estadísticos como la altura significativa espectral, algún tipo de periodo (peak, medio, energético, etc.), dirección representativa (media, peak) y potencia del oleaje (Iglesias y Carballo, 2010). Sin embargo, propagar este conjunto de datos con información simplificada, implica no considerar la distribución de energía en las distintas frecuencias y direcciones para cada estado de mar.

Para desarrollar una caracterización del oleaje de aguas someras mediante una propagación espectral desde aguas profundas, en este estudio, se utilizan como condición de borde, los espectros direccionales que entregan las boyas Triaxys, fondeadas en las cercanías de Curaumilla y Lebu, aproximadamente a 150 [m] de profundidad. Cabe destacar que la condición de borde occidental del dominio de modelación se ubica a una distancia de 41 [km] para Curaumilla y Lebu, ver Figura 5-1 y Figura 5-2, a diferencia de las boyas Triaxys, las cuales se encuentran a una distancia aproximada de 12 [km] y 9 [km] de la costa para Curaumilla y Lebu, respectivamente.

Considerando la distancia entre la ubicación de la condición de borde occidental y la boya, se calcula el tiempo de arribo del oleaje referencial, según la Ecuación 18. Tiempo utilizado para calcular un desfase respecto del tiempo de registro de aguas profundas, en cada estado de mar.

$$t = \frac{D}{C}$$

Ecuación 18

Donde;

t: Tiempo de viaje o arribo.

D: Distancia entre condición de borde y sitio de estudio.

C: Celeridad en aguas profundas, definida en la Ecuación 4.

En ambas zonas para periodos comprendidos entre 8 y 10 [s], el tiempo de arribo no supera los 55 [min].

Con el fin de validar el criterio descrito anteriormente, utilizando el modelo de mayor resolución batimétrica, se extraen resultados de los estadígrafos del oleaje modelados (H_{m0} , T_m y D_m) en las coordenadas de ubicación de la boya Triaxys, para Curaumilla y Lebu. Estos valores son comparados con los datos registrados por las boyas, tal como se presenta en la Figura 5-3 y Figura 5-4 donde se observan las series de tiempo para cada estadígrafo. A su vez en la Figura 5-5, se muestra el grado de correlación

De la comparación, se aprecia que los modelos logran predecir el comportamiento tendencial de la serie de tiempo para cada estadígrafo analizado. Esto es esperable, debido a que, en 150 [m] de profundidad, los periodos menores a 14 segundos no sienten el fondo, tal como es el caso de todos los registros observados en Curaumilla y Lebu. Sin embargo, en ambas localidades se observan diferencias entre los resultados de los modelos y los datos de campo, para los periodos menores a 8 [s], y direcciones asociadas a tales periodos provenientes del cuarto cuadrante. Dado que, el porcentaje de datos de campo de direcciones provenientes del cuarto cuadrante son inferiores al 8.6% para Curaumilla, y a 11.4% para Lebu, se valida la condición de borde impuesta.

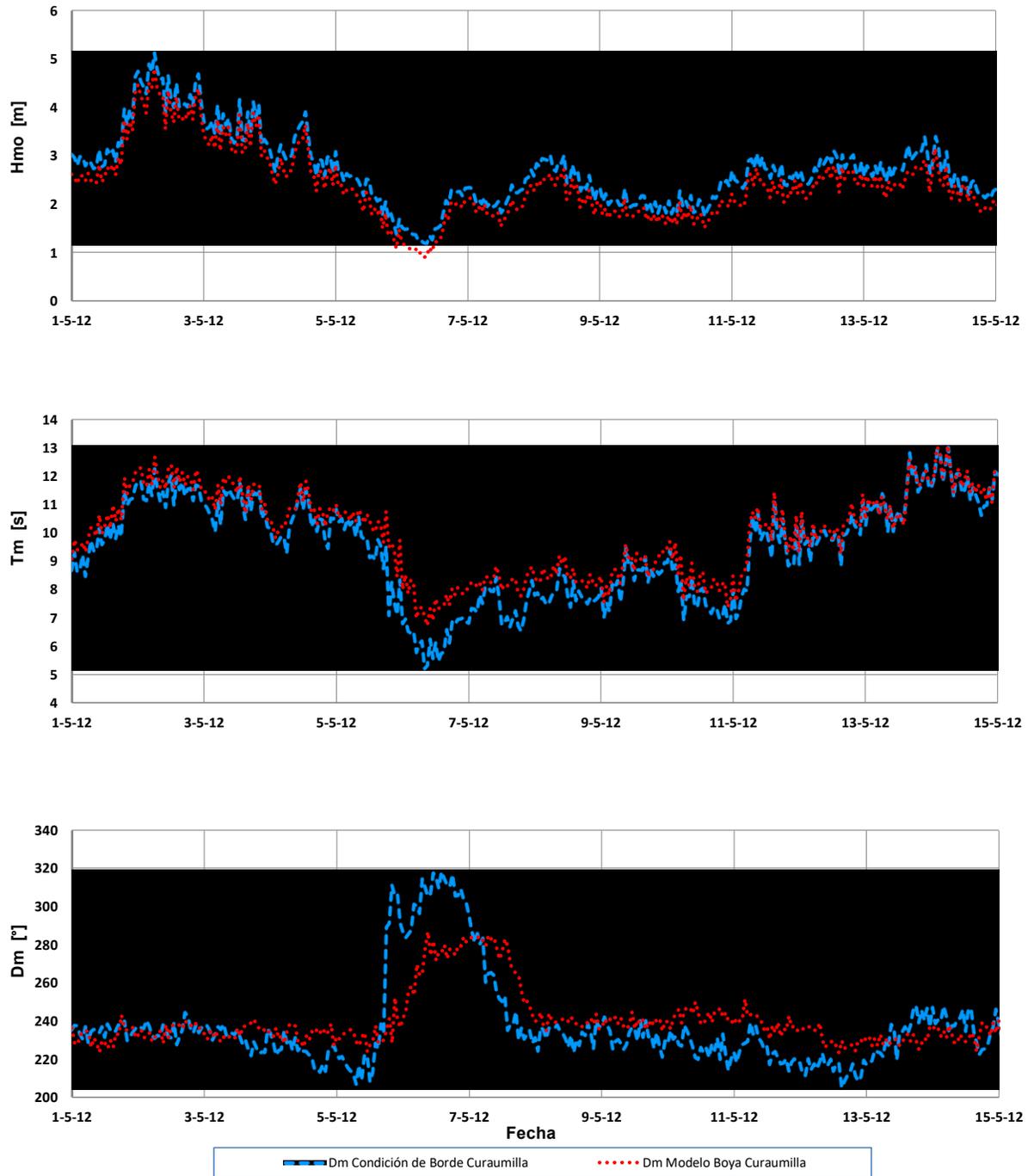


Figura 5-3 Serie de tiempo condición de borde v/s modelo en boya Curaumilla para Hmo, Tm, Dm. Fuente: Elaboración propia

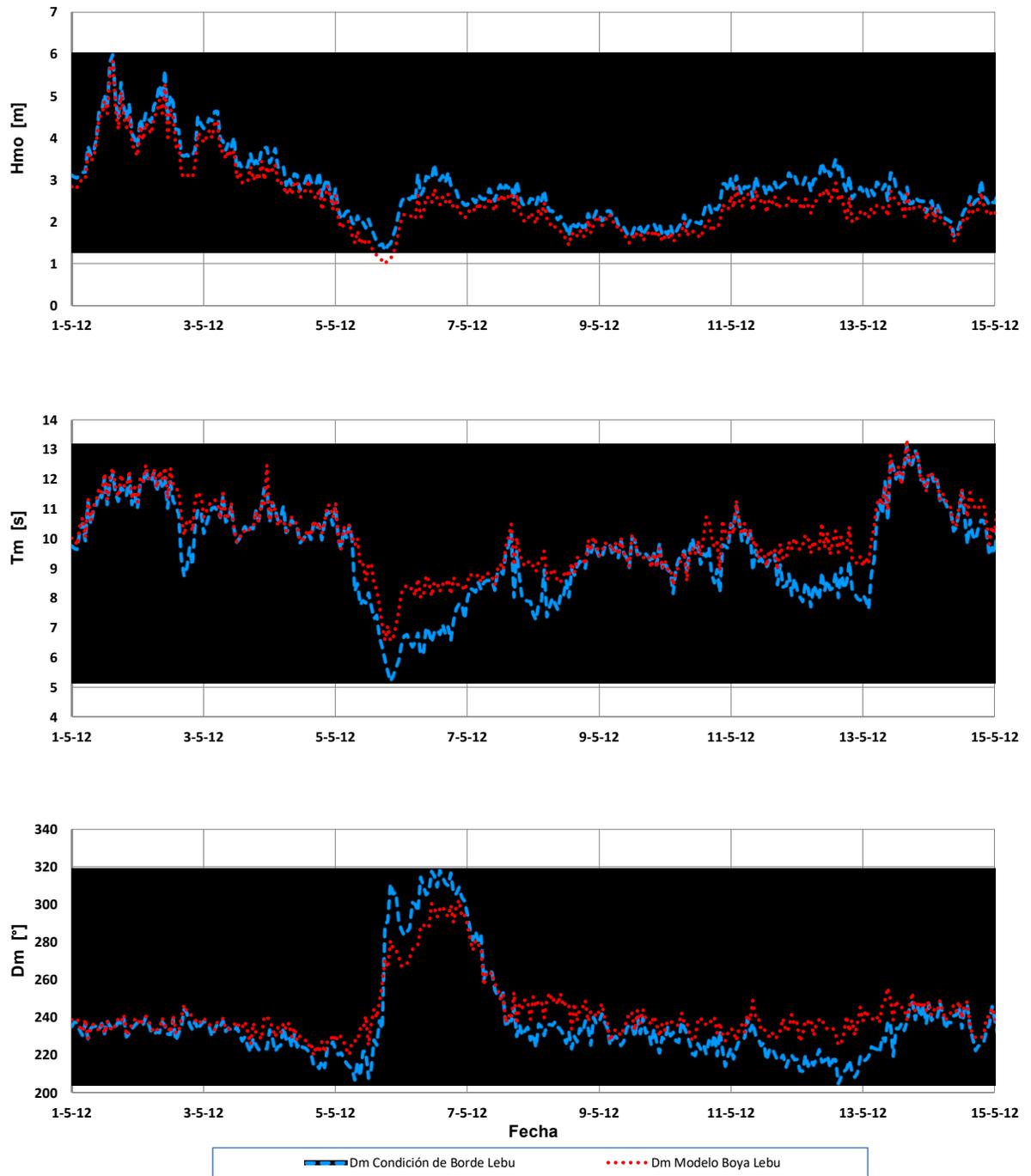


Figura 5-4 Serie de tiempo condición de borde v/s modelo en boya Lebu para Hmo, Tm, Dm.

Fuente: Elaboración propia

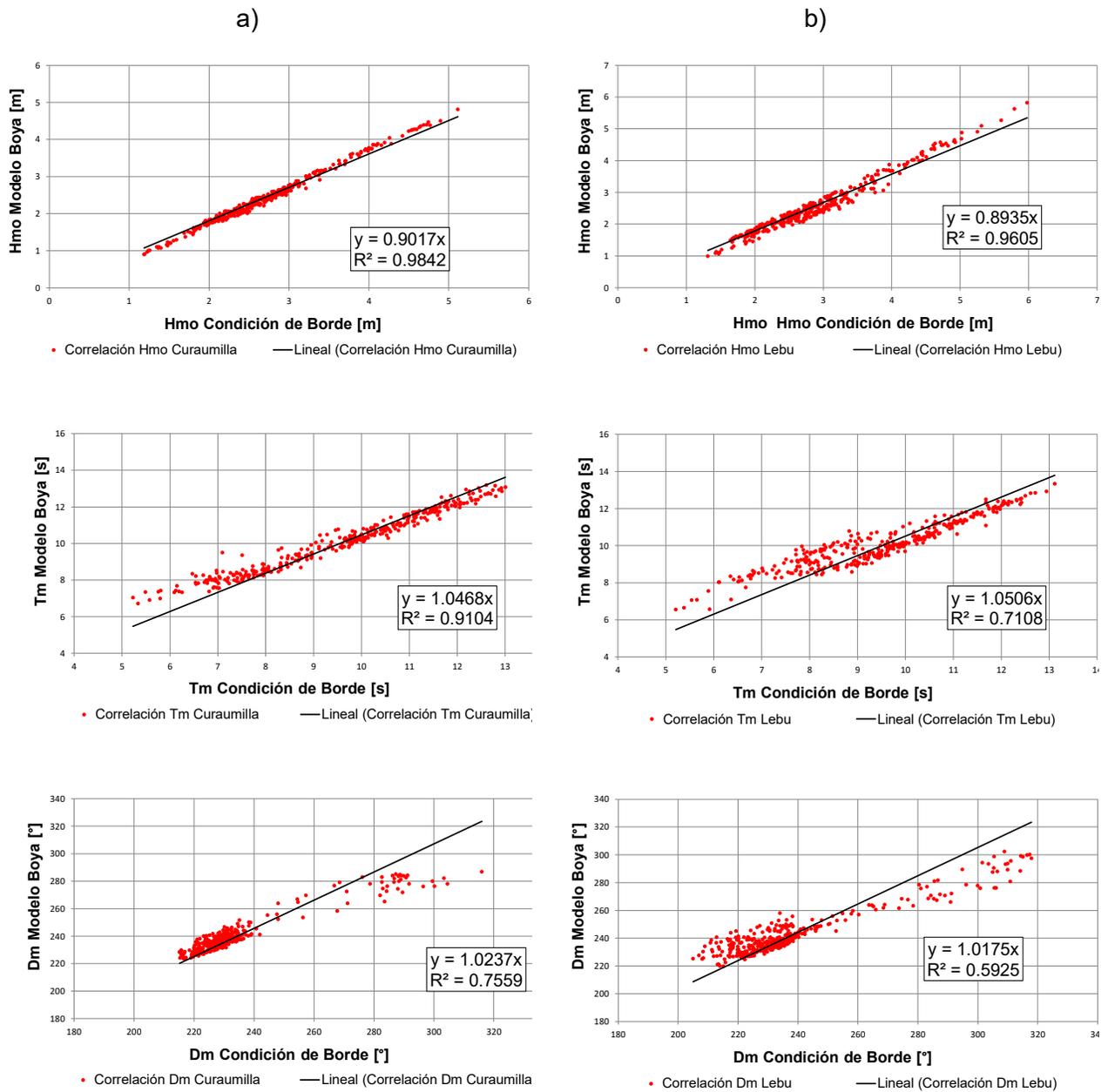


Figura 5-5 Correlación lineal entre resultados modelados v/s datos boya, para Hmo, Tm y Dm en a) Curaumilla y b) Lebu. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la ventana de tiempo de las simulaciones fue seleccionada para calibrar la condición de borde del modelo (espectros boya), respecto de las mediciones obtenidas en aguas someras (ADCP). Por lo tanto, se requiere simultaneidad en las mediciones de campo, en aguas profundas y someras. Finalmente, se selecciona un set de 360 estados de mar que incluyen registros de tormentas con alturas significativas superiores a 4 [m], en un periodo de tiempo de 15 días continuos y coincidentes para ambas localidades, que van desde el 01-05-12 y 15-05-12, ver Tabla 5-3.

Zona	Condición de Borde Occidental	Posición Geográfica Boya		Fechas de modelación
		Latitud [S]	Longitud [O]	
Curaumilla	Boya 1	33° 6' 7.12"	71° 49' 32.86"	01-05-2012 al 15-05-2012
Lebu	Boya 2	37° 35' 41.79"	73° 45' 39.72"	01-05-2012 al 15-05-2012

Tabla 5-3 Condición de borde de los modelos de Curaumilla y Lebu.

A continuación se representan las series de tiempo de los parámetros estadísticos del oleaje; Hmo, Tm y Dm, utilizadas como condición de borde de Curaumilla y Lebu. Las mayores alturas se producen los primeros 4 días de la serie de tiempo, demostrando al criterio utilizado para la elección de la serie de tiempo de la condición de borde, respecto a la tormenta. Por otra parte, los periodos bajos, menores a 7 [s], y direcciones provenientes del cuarto cuadrante, se producen entre los días 6 y 8 de mayo del año 2012.

En la serie de tiempo, para la zona de Curaumilla, se registran alturas sobre los 4 [m], mientras que en Lebu superan los 5 [m].

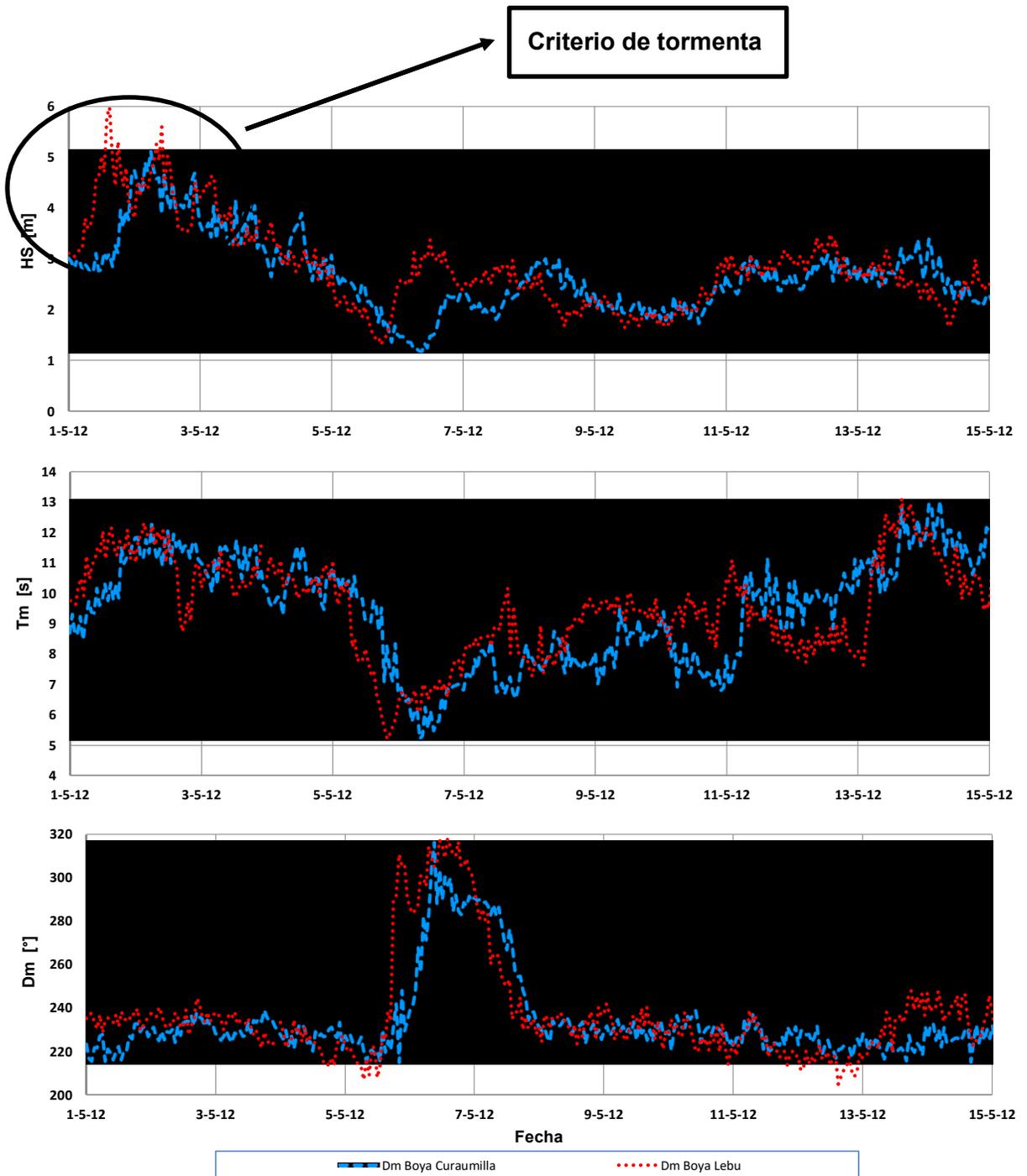


Figura 5-6 Serie de tiempo de Curaumilla y Lebu de condición de borde de H_m , T_m y D_m .

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5-4 y Tabla 5-5, se presenta estadística bi-variada de Hmo y Tm, características de las condiciones de borde para Curaumilla y Lebu, respectivamente. Para Curaumilla, los periodos medios más frecuentes se agrupan entre los de 10-12 [s], alcanzando una frecuencia relativa del 38%. En cambio, para Lebu la mayor concentración de datos se encuentra para periodos más bajos, entre los 8-10 [s], con una frecuencia relativa del 43%. Las alturas significativas más frecuentes se encuentran en el rango de 2.5-3.0 [m] en ambas localidades, alcanzando una frecuencia relativa de un 43% para Curaumilla y 30% para Lebu.

Hmo [m] \ Tm [s]	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	Total General	Frecuencia Relativa %
0.0 - 0.5									0	0.0
0.5 - 1.0									0	0.0
1.0 - 1.5			4	9					13	3.6
1.5 - 2.0			3	17	18				38	10.6
2.0 - 2.5				44	29	19	7		99	27.5
2.5 - 3.0				14	44	49	16		123	34.2
3.0 - 3.5				1	9	24	7		41	11.4
3.5 - 4.0						20			20	5.6
4.0 - 4.5						13	1		14	3.9
4.5 - 5.0						11			11	3.1
5.0 - 5.5							1		1	0.3
5.5 - 6.0									0	0.0
Total General	0	0	7	85	100	136	32	0	360	100.0
Frecuencia Relativa %	0	0	2	24	28	38	9	0	100	

Tabla 5-4 Tabla de incidencia de Hmo-Tm, Curaumilla. Fuente: Elaboración propia.

Hmo [m] \ Tm [s]	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	Total General	Frecuencia Relativa %
0 - 0.5									0	0.0
0.5 - 1									0	0.0
1 - 1.5			3	2					5	1.4
1.5 - 2			2	6	37	4			49	13.6
2 - 2.5			1	14	34	18	4		71	19.7
2.5 - 3				26	52	24	6		108	30.0
3 - 3.5				12	22	24	3		61	16.9
3.5 - 4				1	8	18		1	28	7.8
4 - 4.5					1	16			17	4.7
4.5 - 5						11	3		14	3.9
5 - 5.5						2	2		4	1.1
5.5 - 6						1	2		3	0.8
Total General	0	0	6	61	154	118	20	1	360	100.0
Frecuencia Relativa %	0	0	2	17	43	33	6	0	100	

Tabla 5-5 Tabla de incidencia de Hmo-Tm, Lebu. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 5-7 se observan las rosas de oleaje de Hmo y Tm respecto a la dirección de los datos de propagación de la boya Triaxys, para Curaumilla y Lebu.

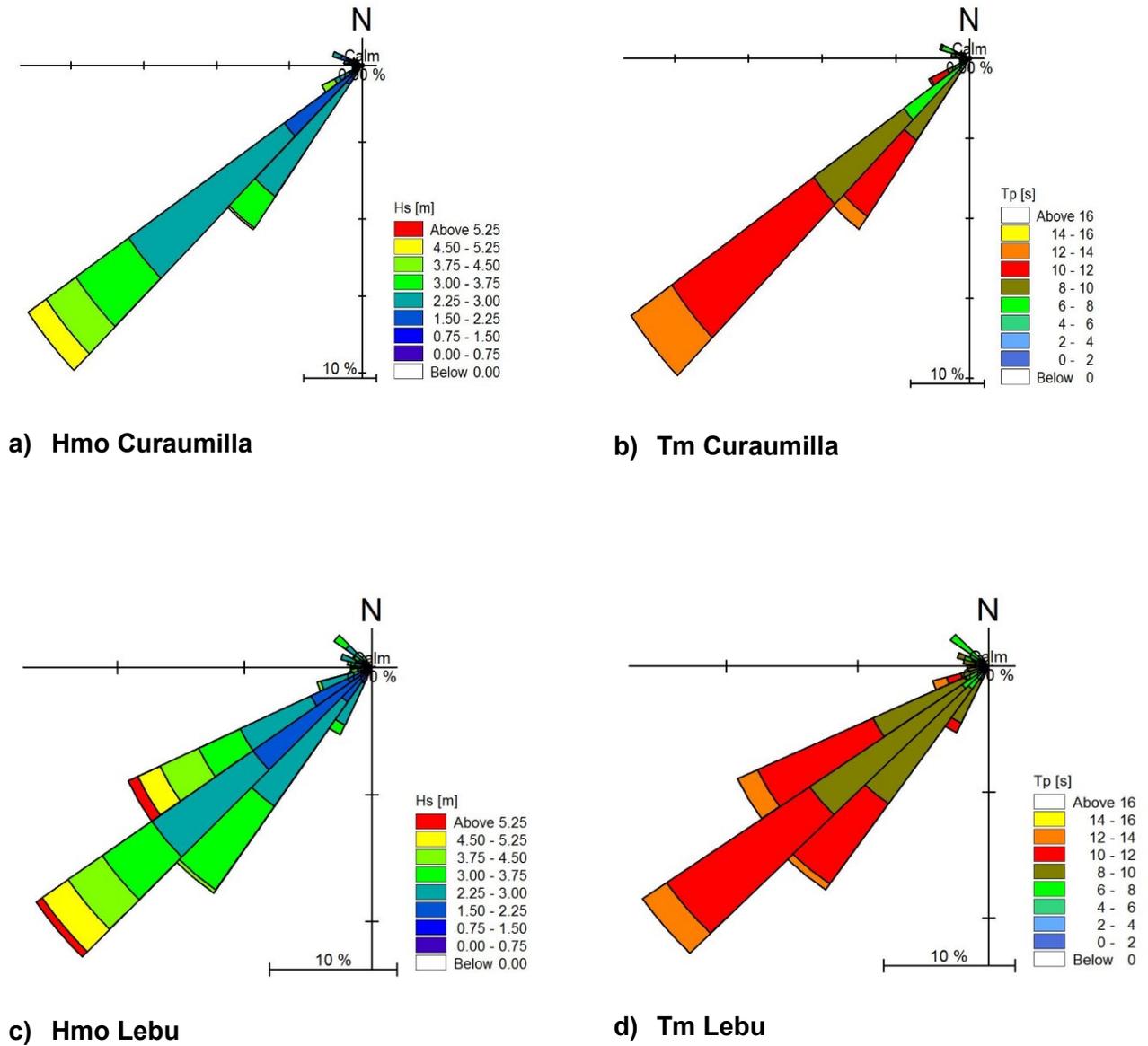


Figura 5-7 Rosas de oleaje de Hmo y Tm para condición de borde, Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración propia.

5.3 MALLA DEL MODELO

Se evalúa la sensibilidad del modelo espectral para 3 mallas de elementos triangulares de distinta resolución espacial, tomando como referencia comparativa una malla fina de 17977 nodos y 11622 nodos para Curaumilla y Lebu, respectivamente. El análisis se realiza comparando los resultados de las 3 mallas respecto de la malla fina, mediante el cálculo del error cuadrático medio (RMSE), el sesgo, y la diferencia porcentual, para los parámetros estadísticos del oleaje; Hmo, Tm, Dm. Esta última se valida comparando con los datos medidos por el ADCP.

Se definen los siguientes criterios para la implementación de las modelaciones, en función de las mallas, para ambas zonas de estudio.

- Igual dominio para las modelaciones.
- Condición de borde, con datos entregados por boya Triaxys.
- Serie de tiempo de 5 días, entre el 05-05-2012 y 09-05-2012.

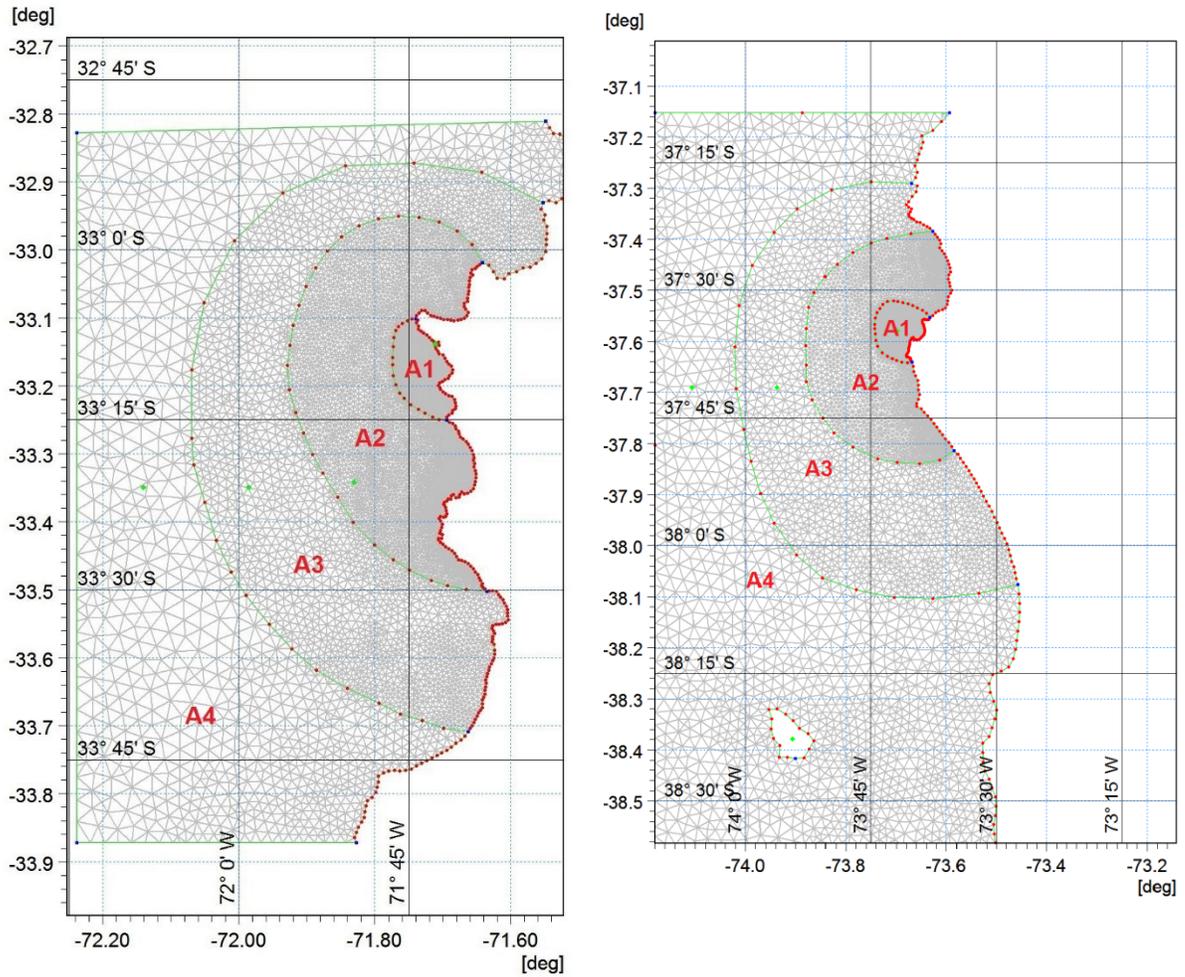
La configuración del modelo de propagación, para cada malla generada considera desactivados todos los parámetros de ajuste del modelo.

Para la interpolación batimétrica, se utiliza método del vecino más cercano o natural neighbour.

Debido a la extensión del dominio de modelación en latitud y longitud, se genera una malla que disminuye gradualmente el tamaño de los elementos de la triangulación, en dirección a la costa. Ello se basa en que, en aguas profundas, el oleaje no se ve afectado por el fondo marino, a diferencia de lo que ocurre en aguas someras. A su vez, se define el tamaño del lado de cada elemento de la malla, en función de la máxima resolución espacial de los datos disponibles, con el objetivo de representar correctamente la variabilidad del fondo marino medida.

La configuración para las 3 mallas evaluadas, consta de 4 subáreas o polígonos dentro del dominio de modelación. En cada uno de los polígonos se aplica el criterio utilizado de la disminución gradual del tamaño de los elementos.

En la Figura 5-8 se muestra el dominio utilizado para Curaumilla y Lebu, junto con las subáreas mencionadas.



Nombre subárea	Tamaño de elementos	Nomenclatura
Área 1	150 - 400 [m]	A1
Área 2	700 - 1400 [m]	A2
Área 3	1600 - 3000 [m]	A3
Área 4	2000 - 5000 [m]	A4

Figura 5-8 Subáreas de mallas para Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5-6 indica para Curaumilla y Lebu, el número de nodos y elementos de las mallas propuestas.

Curaumilla	Nodos	Elementos	Lebu	Nodos	Elementos
Malla 1	3425	6454	Malla 1	3459	6587
Malla 2	7525	14504	Malla 2	6181	11903
Malla 3	11824	22999	Malla 3	8144	15779

Tabla 5-6 Nodos y Elementos elección mallas Curaumilla y Lebu.

En la Tabla 5-7 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad del modelo, respecto de la resolución de la malla de modelación.

a) Curaumilla

	Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Hmo [m]	Sesgo	0.01	0.07	0.02
	RMSE	0.06	0.07	0.03
	Dif%	1.4%	4.5%	1.3%

	Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Tm [s]	Sesgo	0.50	0.21	0.14
	RMSE	0.55	0.22	0.14
	Dif%	6.3%	2.6%	1.7%

	Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Dm [°]	Sesgo	17.35	1.88	7.15
	RMSE	17.54	1.99	7.21
	Dif%	7.0%	-0.8%	2.9%

b) Lebu

	Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Hmo [m]	Sesgo	0.04	0.00	0.01
	RMSE	0.04	0.01	0.01
	Dif%	3.0%	0.3%	0.3%

	Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Tm [s]	Sesgo	0.13	0.03	0.00
	RMSE	0.14	0.05	0.01
	Dif%	1.6%	0.3%	0.0%

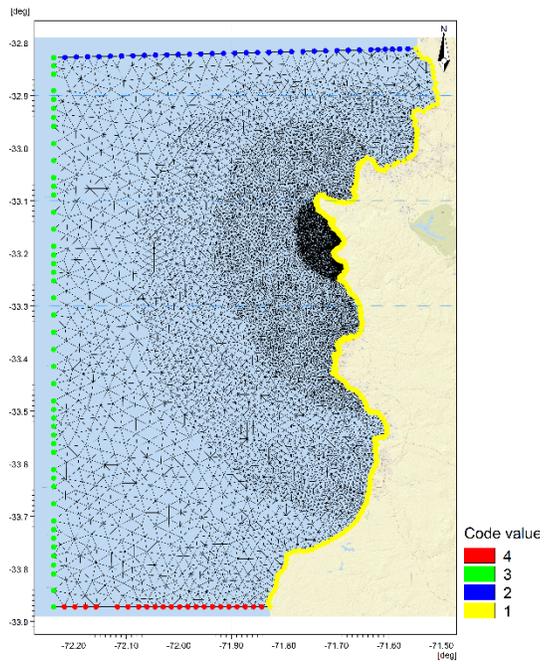
	Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Dm [°]	Sesgo	1.36	0.95	0.40
	RMSE	1.41	0.96	0.49
	Dif%	-0.5%	0.3%	-0.1%

Tabla 5-7 Parámetros estadísticos de error del modelo para Hmo, Tm, Dm según diferentes mallas, a) Curaumilla y b) Lebu. Fuente: Elaboración propia.

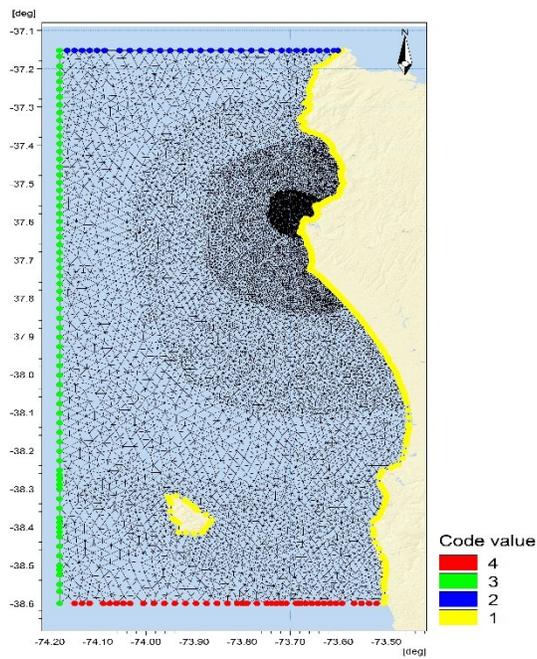
Al observar los resultados de los estadígrafos de altura significativa, periodo medio y dirección media, en función de las mallas implementadas, se infiere que, al aumentar los nodos y elementos triangulares en el dominio de modelación, no se producen cambios considerables, al comparar las 3 mallas sensibilizadas. Las estadísticas representadas en la Tabla 5-7, no presentan mayores variaciones al ser comparados con la configuración de la malla más fina. Esto se debe principalmente a que las 3 mallas evaluadas, no presentan variaciones cuantiosas en las dimensiones de la triangulación de los elementos en cada uno de los polígonos diseñados.

Dado lo anterior, se elige la malla 3 de ambas zonas, en función de los resultados de la altura significativa y periodo medio, pues corresponde a la que tiene mayor cantidad de elementos. En la Tabla 5-7 se observan los indicadores de los parámetros estadísticos de la malla escogida en color rojo.

En las Figura 5-9 se presenta la malla 3 elegida para cada zona en el dominio de modelación y en la Figura 5-10 las gráficas de dispersión para cada zona de estudio.



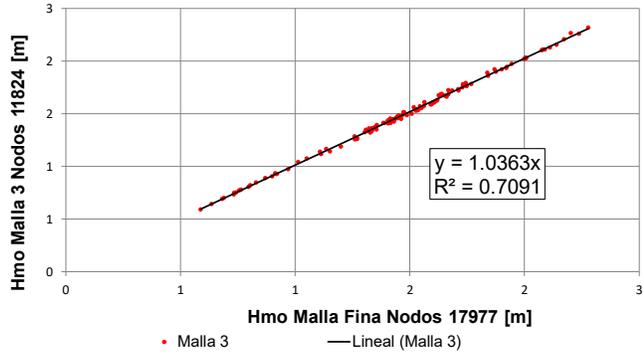
a) Malla Curaumilla



b) Malla Lebu

Figura 5-9 Malla modelo Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración propia.

a) Curaumilla



b) Lebu

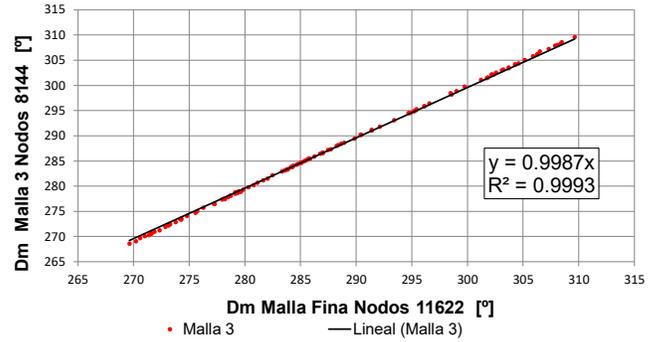
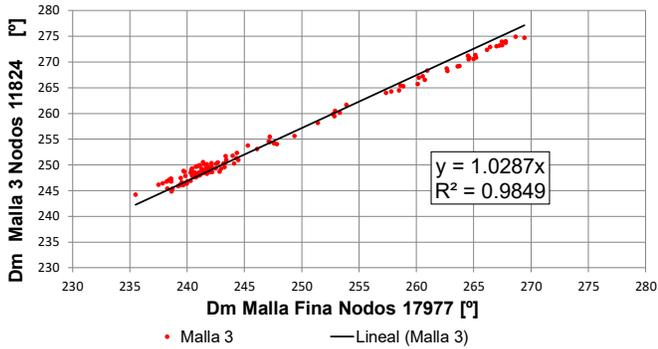
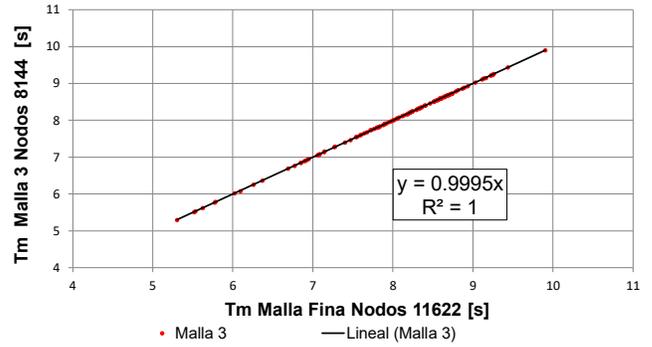
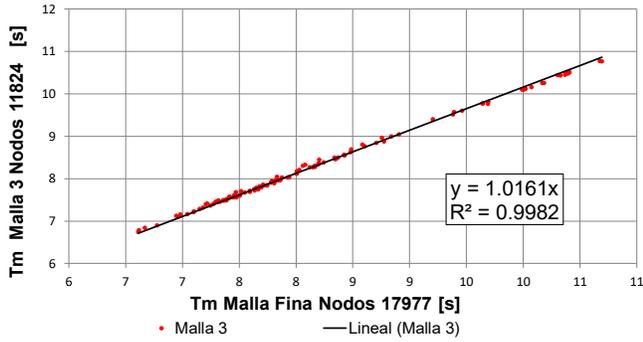
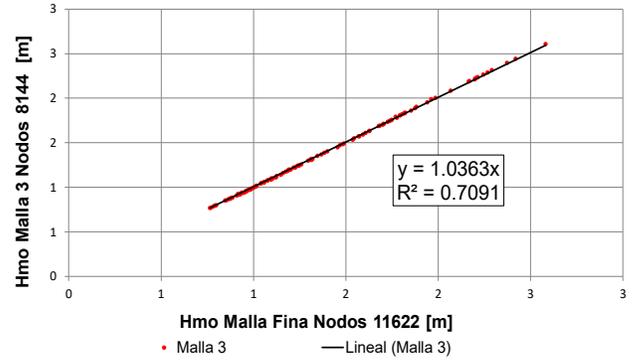


Figura 5-10 Dispersión de Hmo, Tm y Dm para malla de a) Curaumilla y b) Lebu. Malla Fina (eje de abscisa) y malla 3 (eje de ordenada). Fuente: Elaboración propia.

5.4 INTERPOLACIÓN BATIMÉTRICA DE LOS SONDAJES

Para realizar el análisis de sensibilidad del modelo se evalúan los resultados de la propagación espectral, en función de 3 métodos de interpolación de sondeos. Dicho análisis, se efectúa mediante el cálculo del error cuadrático medio RMSE, el sesgo, y la diferencia porcentual, entre los parámetros estadísticos del oleaje H_{m0} , T_m , D_m obtenidos mediante modelaciones y registros en aguas someras.

Se definen los siguientes criterios para la implementación de las modelaciones, en función de la interpolación batimétrica, para ambas zonas de estudio.

- Mismo dominio.
- Malla con elementos triangulares, elegida en sección anterior.
- Condición de borde, con datos entregados por boya Triaxys.
- Serie de tiempo de 5 días, entre el 05-05-2012 y 09-05-2012.

Los métodos de interpolación a estimar son los siguientes.

- Triangulación con interpolación lineal
- Vecino más cercano
- Kriging

La batimetría utilizada para la aplicación de los 3 métodos de interpolación, corresponde a la unión de las fuentes batimétricas de libre acceso de GEBCO y ETOPO, los sondeos de las cartas náuticas y la batimetría de detalle, proporcionada por el proyecto Undimotriz.

El procedimiento de interpolación de sondeos batimétricos se realiza en el programa Surfer 10. Una vez realizada la interpolación batimétrica en las zonas de Curaumilla y Lebu, se asignan los valores de la cota altimétrica, a cada uno de los nodos de la malla. Esta asignación se realiza con el programa Global Mapper 12.

En la Tabla 5-8 se muestran los valores de los errores considerados para los tres interpolaciones estimadas, en la elección del tipo de interpolación batimétrica para Curaumilla y Lebu.

a) Curaumilla

	Parámetro de Error	Triangulación Lineal	Vecino mas cercano	Kriging
Hs [m]	Promedio	1.41	1.43	1.44
	Sesgo	0.03	0.00	0.00
	RMSE	0.20	0.21	0.21
	Dif%	-2%	3%	-1%

	Parámetro de Error	Triangulación Lineal	Vecino mas cercano	Kriging
Tm [s]	Promedio	8.48	8.56	8.55
	Sesgo	-0.01	0.07	0.07
	RMSE	0.57	0.57	0.57
	Dif%	0.1%	1.1%	3.0%

	Parámetro de Error	Triangulación Lineal	Vecino mas cercano	Kriging
Dm [°]	Promedio	257	260	259
	Sesgo	5.86	8.64	7.55
	RMSE	7.35	9.64	8.71
	Dif%	2.3%	3.4%	3.0%

b) Lebu

	Parámetro de Error	Triangulación Lineal	Vecino mas cercano	Kriging
Hs [m]	Promedio	1.17	1.18	1.17
	Sesgo	0.02	0.04	0.03
	RMSE	0.21	0.22	0.22
	Dif%	5%	7%	6%

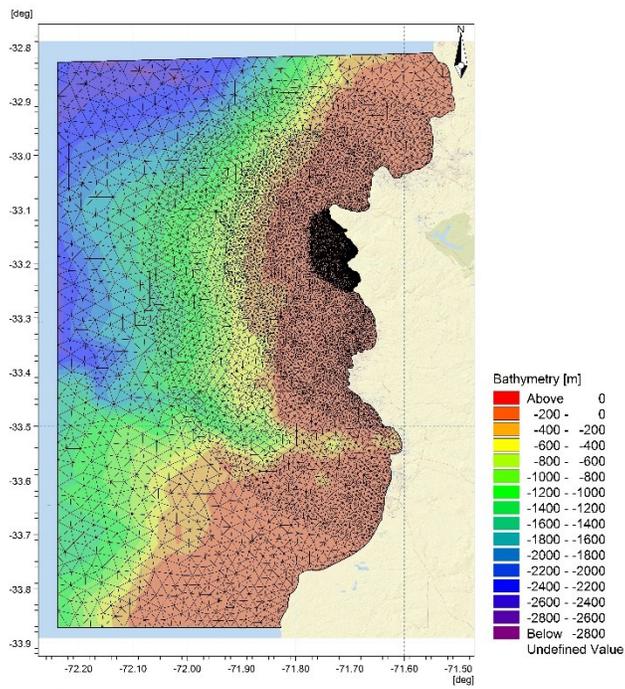
	Parámetro de Error	Triangulación Lineal	Vecino mas cercano	Kriging
Tm [s]	Promedio	6.80	6.82	6.81
	Sesgo	0.68	0.70	0.69
	RMSE	1.09	1.11	1.10
	Dif%	11.8%	12.1%	11.9%

	Parámetro de Error	Triangulación Lineal	Vecino mas cercano	Kriging
Dm [°]	Promedio	302	302	302
	Sesgo	-10.50	-11.02	-10.63
	RMSE	12.12	12.63	12.25
	Dif%	-3.5%	-3.7%	-3.5%

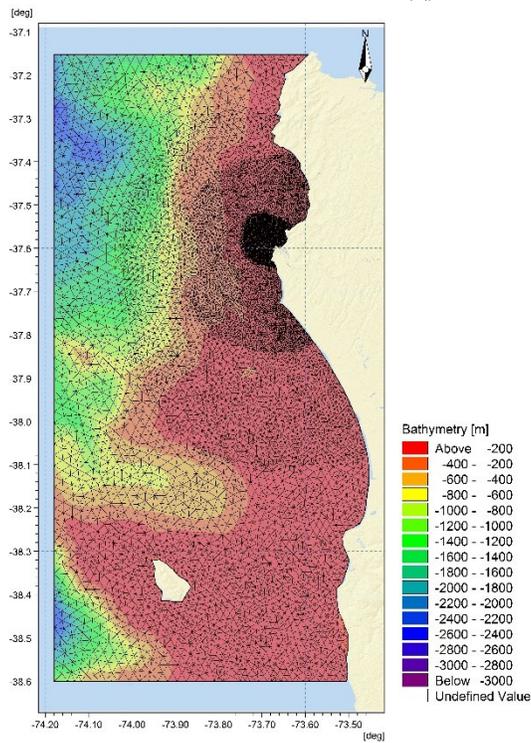
Tabla 5-8 Parámetros estadísticos de error del modelo para Hmo, Tm, Dm según diferentes interpolaciones, Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración propia.

El promedio, sesgo, RMSE y la diferencia porcentual, tal como se observa en la Tabla 5-8 no presenta una diferencia destacada en los resultados de Hmo, Tm y Dm, para los 3 métodos de interpolación utilizados en los sondeos batimétricos. Es por esto que se elige el método de interpolación de triangulación lineal, para ambas zonas de estudio, debido a que, en promedio, para cada uno de los estadígrafos, es el que tiene un menor error asociado a los datos de campo medidos por el ADCP. El Tm y Dm, son los estadígrafos que presentan una mayor dispersión en los resultados, a diferencia de lo que ocurre con el Hs que no exhibe considerables diferencias.

En las Figura 5-11 y Figura 5-12 se presenta el dominio de modelación con la superficie batimétrica interpolada de cada zona de estudio y las gráficas de dispersión de la interpolación elegida, respecto a las mediciones del ACP.



a) Curaumilla



b) Lebu

Figura 5-11 Interpolación batimétrica con triangulación lineal Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración propia.

a) Curaumilla

b) Lebu

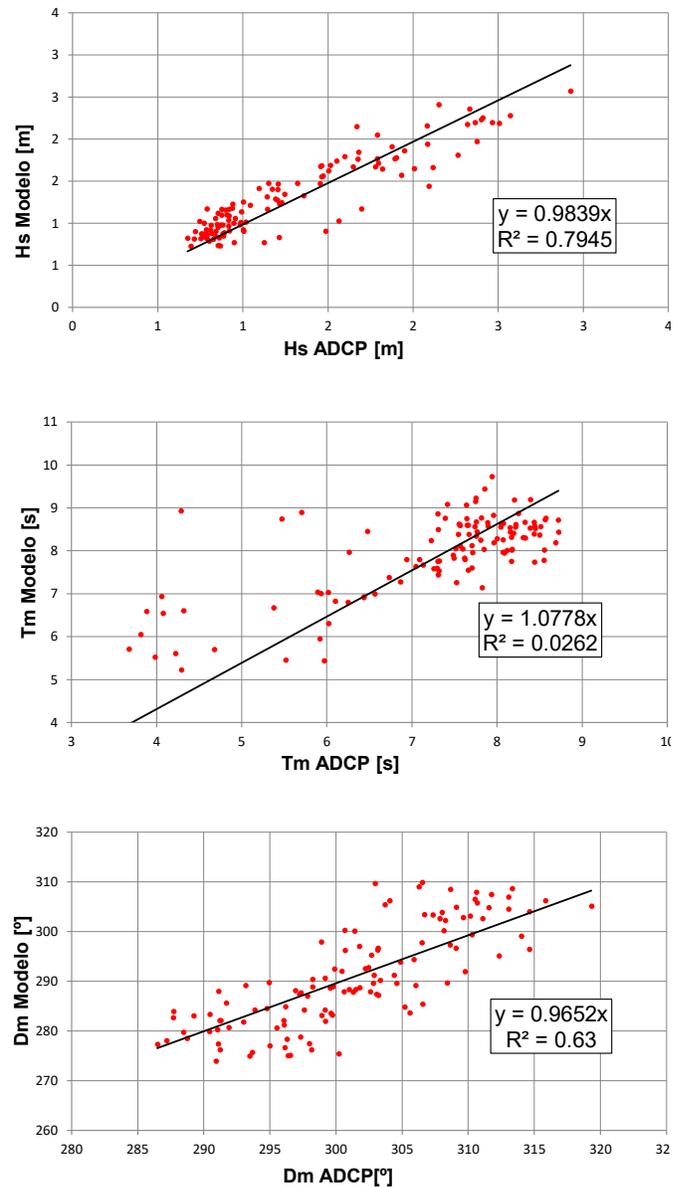
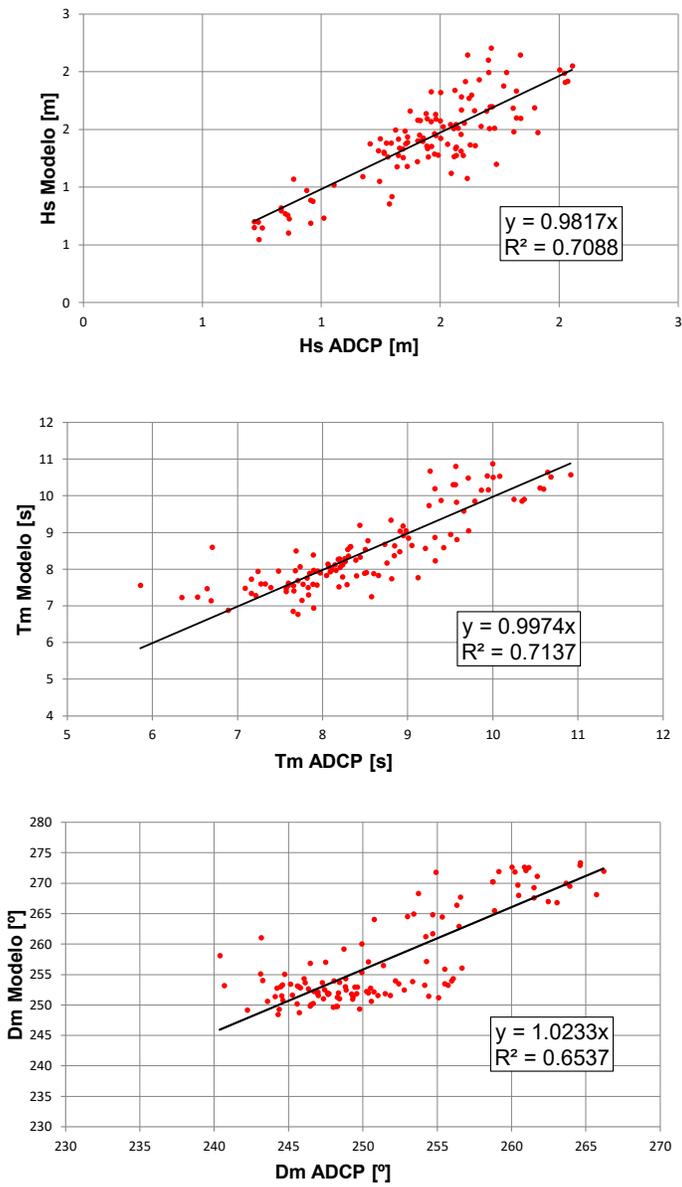


Figura 5-12 Dispersión de Hmo, Tm y Dm para interpolación batimétrica con triangulación lineal a) Curaumilla y b) Lebu. ADCP (eje de abscisa) y el modelo (eje de ordenada). Fuente: Elaboración propia.

5.5 PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MODELO

Una vez definido el tipo malla y el método de interpolación batimétrico, se procede a evaluar la sensibilidad de los parámetros de ajuste del modelo numérico, indicados a continuación.

- Difracción.
- Interacción no lineal.
- Fricción de fondo (bottom friction).
- Disipación debida al whitecapping.
- Disipación debido al rompimiento (wave breaking).

Para realizar este análisis se evalúan los resultados de la propagación espectral, en función de los parámetros de ajuste del modelo numérico. Dicho análisis se efectúa mediante el cálculo del error cuadrático medio RMSE, el sesgo, y la diferencia porcentual, entre los parámetros estadísticos del oleaje: H_{m0} , T_m , D_m obtenidos mediante modelaciones y mediciones de ADCP en aguas someras.

Este procedimiento se realiza únicamente para la zona de Curaumilla, debido a que los tiempos de cálculo y los resultados respecto a las diferentes zonas, no tienen mayor variación en los resultados del análisis, asociado al mejor ajuste del modelo. Por lo que la configuración del modelo seleccionado para la zona de Curaumilla, se replicará para la zona de Lebu.

Se definen los siguientes criterios para la implementación de las modelaciones, en función de los parámetros de ajuste del modelo numérico.

- Mismo dominio
- Malla con elementos triangulares
- Método de triangulación con interpolación lineal
- Condición de borde, con datos entregados por boya Triaxys
- Serie de tiempo de 5 días, entre el 05-05-2012 y 09-05-2012

En la Tabla 5-9 se muestran los 12 casos evaluados para el análisis de sensibilidad.

Casos	Difracción	Interacción no lineal		Wave breaking	White capping
		Cuadrupletos-Olas	Triadas-Olas		
1	No	No	No	No	No
2	Si	No	No	No	No
3	No	Si	No	No	No
4	No	No	Si	No	No
5	No	No	No	Si	No
6	No	No	No	No	Si
7	No	No	No	Si	Si
8	No	No	Si	No	Si
9	Si	No	No	No	Si
10	No	No	Si	Si	Si
11	Si	Si	No	Si	Si
12	No	Si	No	Si	Si

Tabla 5-9 Casos evaluados en la sensibilidad de parámetros de ajuste, Curaumilla.

Los primeros 6 casos, se definen para evaluar la contribución de cada término de forma individual, y los siguientes 6 se escogen para que haya mayor sensibilidad de los parámetros de ajuste del modelo. Se obvia la activación de olas cuadrupletos y triadas de forma simultánea, debido a que la combinación de ambas puede causar inestabilidad y no convergencia.

El resumen de los resultados de la sensibilidad se presenta para cada combinación, en la Tabla 5-10, donde se agrupa considerando Hmo, Tm y Dm, respecto a los parámetros estadísticos del error.

	SESGO	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12
Hmo [m]	Sesgo	0.01	0.01	No conv.	0.01	0.01	-0.02	0.03	-0.02	-0.16	-0.02	0.06	0.06
	RMSE	0.38	0.38	No conv.	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.56	0.37	1.10	1.03
	Dif%	3.2%	3.3%	No conv.	3.2%	3.2%	1.3%	1.3%	1.3%	-8.9%	1.3%	11.8%	11.0%
Tm [s]	RMSE	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12
	Sesgo	0.15	0.15	No conv.	0.14	0.15	0.42	0.42	0.42	-0.44	0.42	0.43	0.43
	RMSE	0.82	0.82	No conv.	0.82	0.82	0.88	0.88	0.88	2.82	0.88	1.26	1.27
Dm [°]	DIF %	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12
	Sesgo	7.94	7.64	No conv.	7.95	7.94	8.40	8.40	8.41	-17.37	8.41	8.54	8.82
	RMSE	9.47	9.26	No conv.	9.48	9.47	9.90	9.90	9.91	77.88	9.91	9.98	10.19
	Dif%	3.2%	3.1%	No conv.	3.2%	3.2%	3.4%	3.4%	3.4%	-7.2%	3.4%	3.4%	3.5%

Tabla 5-10 Parámetros estadísticos de error del modelo para Hmo, Tm, Dm según parámetros físicos del modelo. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 5-10 indica que no existe una diferencia clara entre las 12 combinaciones que incluyen los parámetros físicos del modelo. Por otro lado, el caso 3 se vuelve inestable no convergiendo en ninguno de los estados de tiempo del modelo, que considera la activación de los cuádrupletos.

De los 12 casos evaluados, los casos 6, 7, 8 y 10, tienen un menor error asociado al observar los estadígrafos mostrados en la Tabla 5-10. Se observa que entre estos casos no existe una diferencia significativa en la predicción de H_{m0} , T_m y D_m , por lo que se podría escoger cualquier de ellos, sin generar relevantes diferencias.

De los casos 6, 7, 8 y 10, el tiempo de cómputo que demora la simulación, es la variable con la que se escoge el caso para el modelo de propagación espectral. Los tiempos para los 4 casos en discusión, se muestran en la Tabla 5-11.

Casos	Tiempo de cómputo [hrs]
Caso 6	52
Caso 7	55
Caso 8	119
Caso 10	120

Tabla 5-11 Tiempo de cómputo de casos pre seleccionados respecto a los parámetros de ajuste del modelo.

Los casos 8 y 10 demoran más del 50% de tiempo de computo que el 6 y 7, por lo que se eliminan de la selección. Indicado lo anterior, la configuración escogida, al evaluar los parámetros de ajuste del modelo, es la combinación del caso 6, que de demora menos tiempo, 52 [hrs].

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS BATIMÉTRICOS

Una vez calibrado el modelo de propagación espectral, se realizan modelaciones considerando un periodo de tiempo de 15 días, para distintos escenarios batimétricos. Se evalúa el ajuste de los resultados modelados, en el punto del ADCP, mediante el cálculo de los parámetros estadísticos del error. Finalmente, se cuantifica la dispersión de los resultados de las modelaciones de los escenarios batimétricos en algunas secciones arbitrarias de control.

6.1 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS BATIMÉTRICOS

Se definen 5 escenarios batimétricos a partir de la información batimétrica recopilada de diversas fuentes. Se construye un set de datos de sondajes, que se diferencian entre sí fundamentalmente en la extensión de la batimetría de detalle considerada para la representación de la superficie batimétrica.

Cada escenario batimétrico incluye información de sondajes como sigue:

Escenario 1: Carta náutica SHOA + Batimetría ETOPO + Batimetría GEBCO + Batimetría local hasta los -100 [m] de profundidad.

Escenario 2: Carta náutica SHOA + Batimetría ETOPO + Batimetría GEBCO + Batimetría local hasta los -80 [m] de profundidad.

Escenario 3: Carta náutica SHOA + Batimetría ETOPO + Batimetría GEBCO + Batimetría local hasta los -60 [m] de profundidad.

Escenario 4: Carta náutica SHOA+ Batimetría ETOPO + Batimetría GEBCO + Batimetría local hasta los -40 [m] de profundidad.

Escenario 5: Carta náutica SHOA.

Nombre	Nomenclatura
Escenario 1	(G+E+S+D)
Escenario 2	(G+E+S+D-80)
Escenario 3	(G+E+S+D-60)
Escenario 4	(G+E+S+D-40)
Escenario 5	(SHOA)

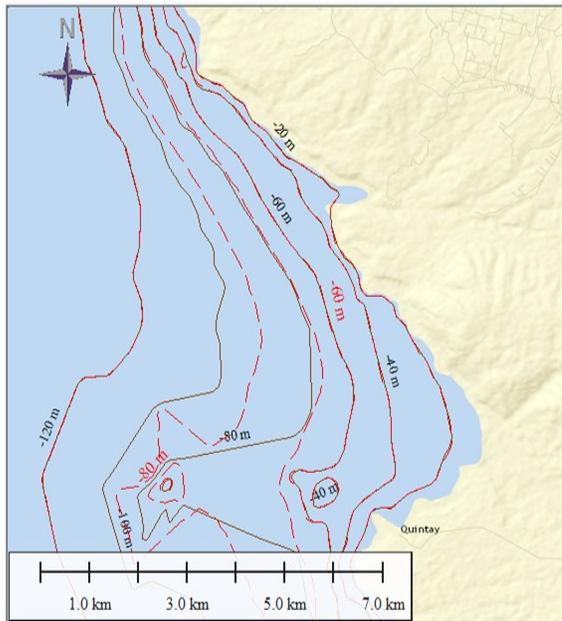
Tabla 6-1 Nomenclatura de escenarios batimétricos, para Curaumilla y Lebu.

El escenario 5 sólo incluye los sondeos disponibles en las cartas náuticas del SHOA. Por otra parte, para los escenarios 1 al 4, se utiliza la información batimétrica de detalle obtenida en terreno con extensión hasta los veriles -100 y -40, respectivamente. Ésta se complementa tanto con sondeos SHOA disponibles, y de ETOPO. Desde aproximadamente el veril -120 hacia aguas profundas se utilizan sondeos GEBCO. Es importante señalar que se realiza una revisión y pre procesamiento de toda la información batimétrica, de manera de identificar los sitios donde se produce una superposición entre sondeos de distintas fuentes, en cuyo caso se prioriza el uso de la información de detalle obtenida en campo, luego SHOA, ETOPO y GEBCO (en ese orden). De esta manera se evita la representación de pendientes abruptas en la superficie batimétrica, originada por diferencias entre los sondeos traslapados de distinta fuente, considerando una tolerancia entre 5 y 10 metros.

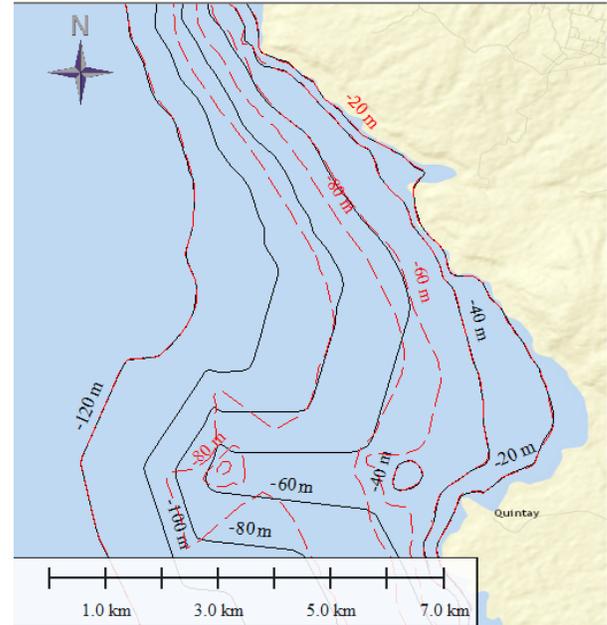
En la Figura 6-1 y Figura 6-2, se representan los veriles, cada 20 metros, en los distintos escenarios batimétricos definidos para Curaumilla y Lebu, respectivamente. En cada sub figura se observan en color rojo, los veriles para el escenario 1, el cual contiene la mayor información de sondeos. Asimismo, por cada sub figura, se presentan los veriles en color azul asociados a otro escenario. Complementariamente, en la Figura 6-3, se observan 2 cortes transversales a las bahías de Curaumilla y Lebu que permiten comparar las diferencias de interpolación alrededor de la zona de levantamiento de detalle, en función de la extensión de sondeos utilizados.

Al comparar las batimetrías definidas para cada escenario, en el caso de Curaumilla, se observa que las mayores diferencias en profundidad se producen entre los veriles -60 y -120, alcanzando un valor máximo cercano a 25 metros. En el caso del escenario 1, en la vista elevación en la sección transversal a la bahía se observa una pendiente de fondo cóncava. A medida que se reduce la extensión de los sondeos, se aprecian pendientes lineales de aproximación a la costa más abruptas, que subestiman las profundidades particularmente entre los veriles -60 y -120, en comparación al escenario 1.

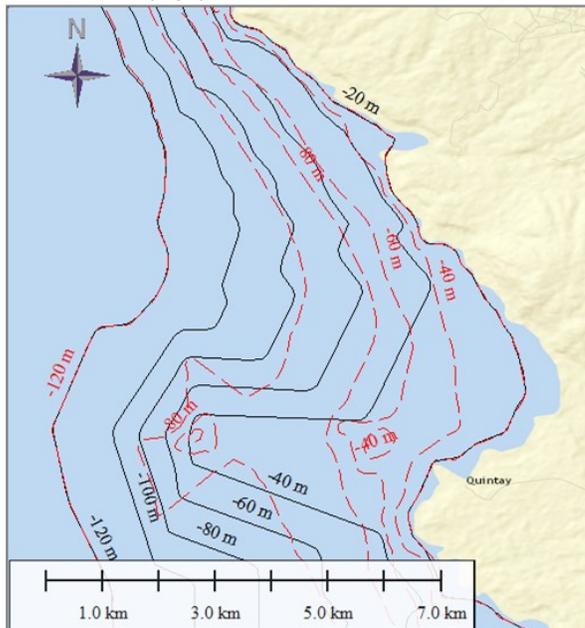
En el caso de Lebu, se generan pendientes lineales de aproximación a la costa, que sobreestiman las profundidades entre los veriles -60 y -120, alcanzando diferencias máximas, entre 2 escenarios, del orden de 40 metros, ver Figura 6-3.



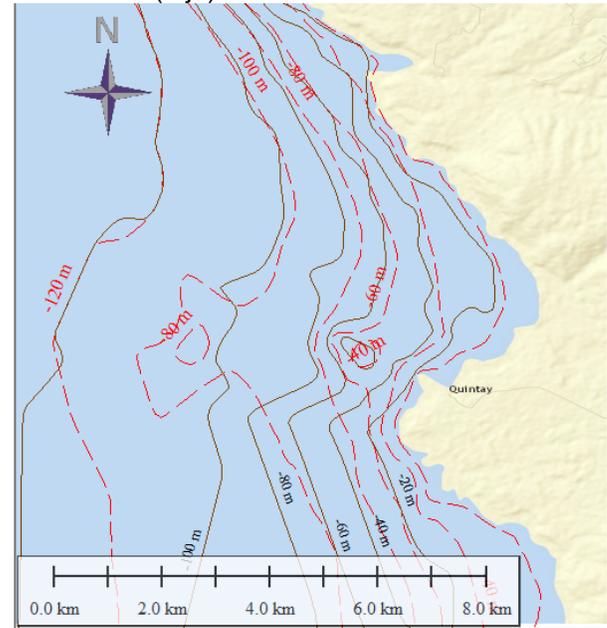
a) Batimetría con extensión de detalle hasta el veril -80 (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).



b) Batimetría con extensión de detalle hasta el veril -60 (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).

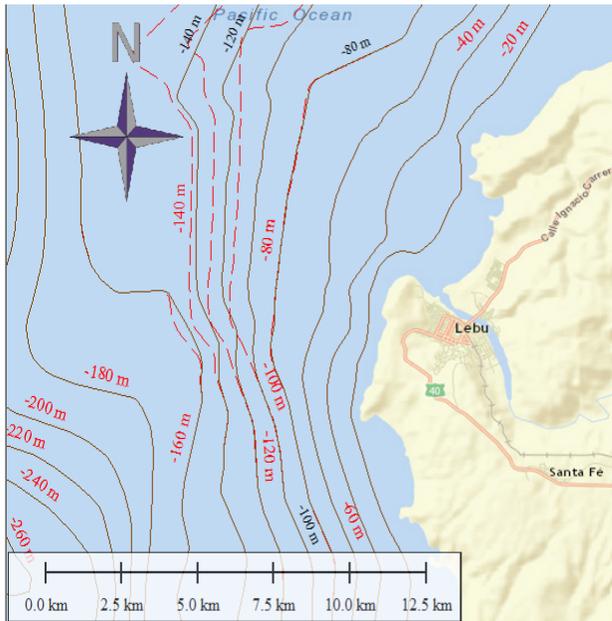


c) Batimetría con extensión de detalle hasta el veril -40 (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).

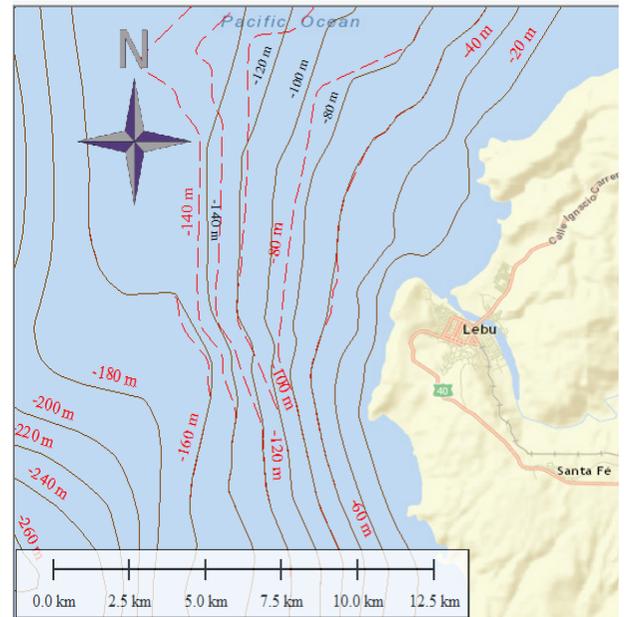


d) Batimetría solo con cartas náuticas del SHOA (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).

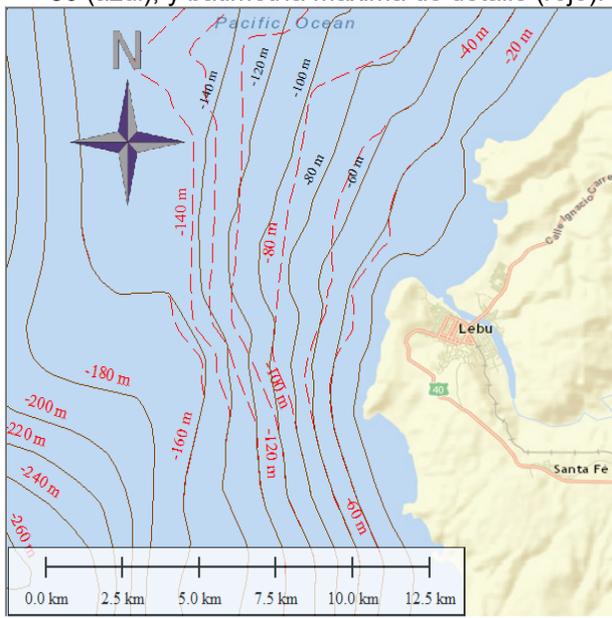
Figura 6-1 Curvas de nivel de escenarios batimétricos, Curauquilla. Fuente: Elaboración Propia.



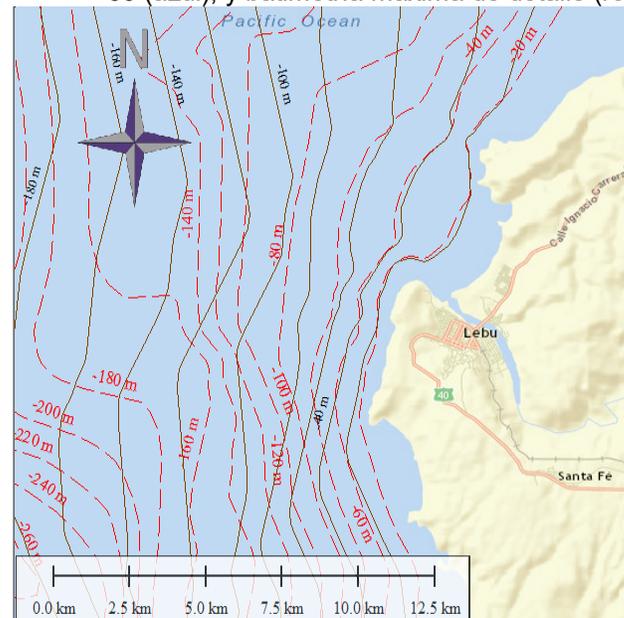
a) Batimetría con extensión de detalle hasta el veril -80 (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).



b) Batimetría con extensión de detalle hasta el veril -60 (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).

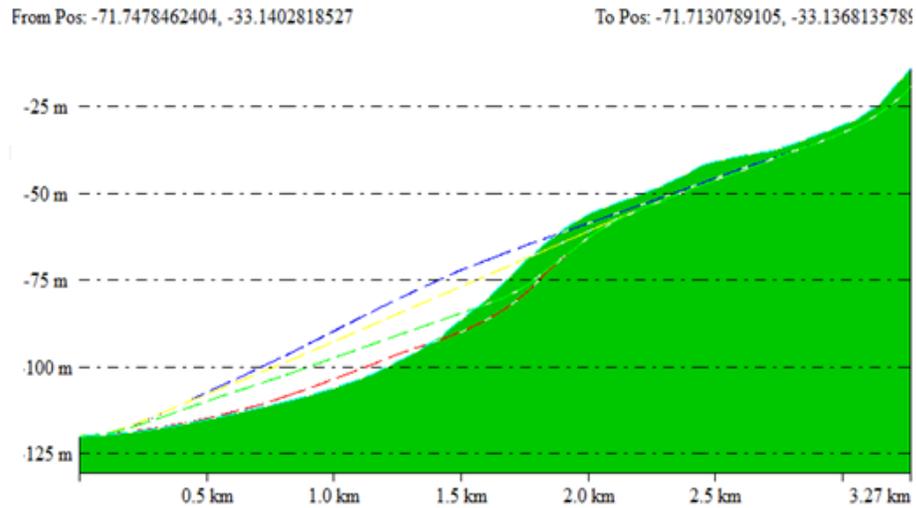


c) Batimetría con extensión de detalle hasta el veril -40 (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).



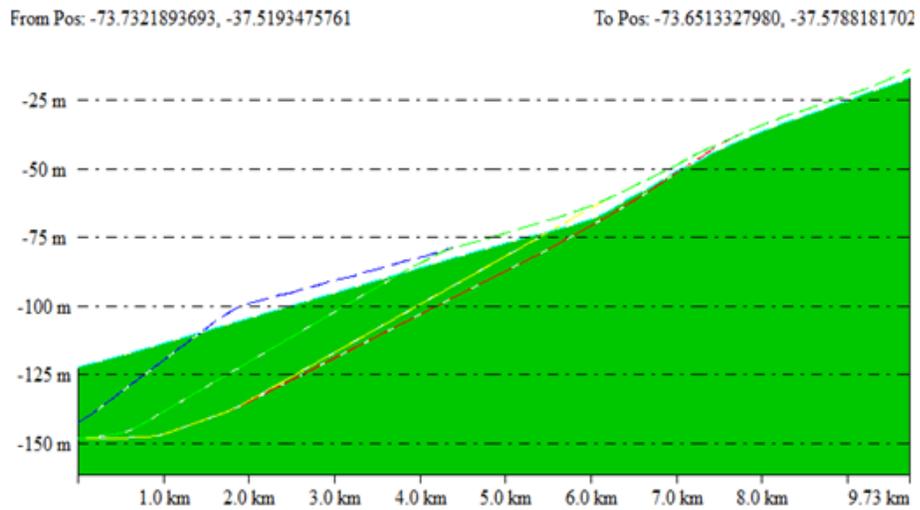
d) Batimetría solo con cartas náuticas del SHOA (azul), y batimetría máxima de detalle (rojo).

Figura 6-2 Curvas de nivel de escenarios batimétricos, Lebu. Fuente: Elaboración Propia.



a) Vista elevación, sección de corte transversal a bahía de Curaumilla. Azul: SHOA, Amarillo: G+E+S+D-40, Verde: G+E+S+D-60, Rojo: G+E+S+D-80, Coloreado: G+E+S+D.

b)



c) Vista elevación, sección de corte transversal a bahía de Lebu. Azul: SHOA, Amarillo: G+E+S+D-40, Verde: G+E+S+D-60, Rojo: G+E+S+D-80, Coloreado: G+E+S+D.

Figura 6-3 Corte transversal para Curaumilla y Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

6.2 PARÁMETROS DE ERROR DE LOS ESTADÍGRAFOS MODELADOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones aplicadas a los 5 escenarios batimétricos, tomando como referencia la información de campo obtenida con ADCP, se comparan cualitativamente las series de tiempo modeladas versus el dato de ADCP. El grado de ajuste de estas series se cuantifica mediante el cálculo de los principales parámetros estadísticos de error aplicados sobre las variables de altura H_{mo} , T_m y D_m . Por otro lado, se presentan curvas de probabilidad de excedencia asociadas a cada escenario batimétrico versus la del dato de ADCP, de manera de visualizar como se afectan debido a las diferencias batimétricas de las superficies modeladas para cada escenario. Este análisis se efectúa para ambas localidades.

6.2.1 CURAUMILLA

En general las modelaciones de los escenarios batimétricos logran reproducir con precisión el oleaje en la zona de Curaumilla, para los 3 parámetros estadísticos evaluados. En la Figura 6-4, Figura 6-5 y Figura 6-6, se resumen los cálculos del error estadístico, gráficas de probabilidad de excedencia y la serie de tiempo, de H_{mo} , T_m y D_m , respectivamente.

En relación al error en la estimación de H_{mo} , todos los escenarios que incluyen la batimetría de detalle se caracterizan por un error promedio del orden de 0.36 [m], mientras que este valor alcanza los 0.47 [m] para el escenario con batimetría SHOA.

El escenario batimétrico que considera sólo la batimetría SHOA alcanza una diferencia porcentual media, respecto del ADCP, de -16.4%, mientras que el mismo parámetro estadístico para los demás escenarios, quedan comprendidas en el rango entre -2.7% y -7.0%, aumentando a medida que se disminuye la información batimétrica. El sesgo de H_{mo} , para los modelos con batimetría de detalle varía entre -0.07 [m] y -0.15 [m], mientras que para el escenario SHOA se alcanzan errores de -0.33 [m]. Una representación cualitativa de lo anterior se expresa en las gráficas de excedencia y en las series de tiempo, en donde se aprecia una tendencia generalizada de los escenarios a subestimar los valores de H_{mo} , ver Figura 6-4 a Figura 6-6.

En la estimación del error del periodo medio, se observa que los modelos exhiben similar capacidad predictiva para todos los escenarios batimétricos. Se nota una sobreestimación generalizada de los escenarios, respecto del ADCP, que se agudiza para los para periodos sobre 10 [s], alcanzando un sesgo del orden de 0.3 [s] para los escenarios de detalle sobre el veril -60, y de 0.18 [s] para los escenarios con batimetría SHOA y de detalle hasta el veril -40. Notablemente, los periodos simulados para los escenarios con batimetría SHOA y con detalle hasta el veril -40, o escenario 4, alcanzan la menor desviación porcentual observada igual a 2.1 %, y además presentan error cuadrático medio, cercano a 0.9 [s].

Analizando el comportamiento de los modelos en la predicción de D_m , se observa un mayor ajuste para las direcciones cercanas a los 250° , asociadas a una probabilidad de excedencia menor al 20%. Se exhibe una marcada tendencia de los modelos a calcular direcciones mayores en la medida que los datos son menos frecuentes, de probabilidad de excedencia inferior a 10%, y asimismo para los datos con probabilidades de excedencia sobre el 50%. El sesgo está en el rango de 3.58° y 5.41° , mientras que el error cuadrático medio, está en el rango 6.55° y 7.54° . Cabe destacar, que para direcciones bajo los 250° , el modelo tiende a lograr un mejor ajuste en la medida que los escenarios batimétricos incluyen más información de detalle. Ocurre lo contrario a medida que la dirección supera los 250° , en donde el resultado que más se ajusta al dato de terreno proviene de la modelación del escenario con batimetría SHOA.

	Parámetro	(G+E+S+D)	(G+E+S+D-80)	(G+E+S+D-60)	(G+E+S+D-40)	(SHOA)
Hmo [m]	Media	1.77	1.77	1.75	1.69	1.51
	Sesgo	-0.07	-0.08	-0.09	-0.15	-0.33
	RMSE	0.37	0.36	0.37	0.38	0.47
	Dif%	-2.7%	-3.1%	-3.7%	-7.0%	-16.4%

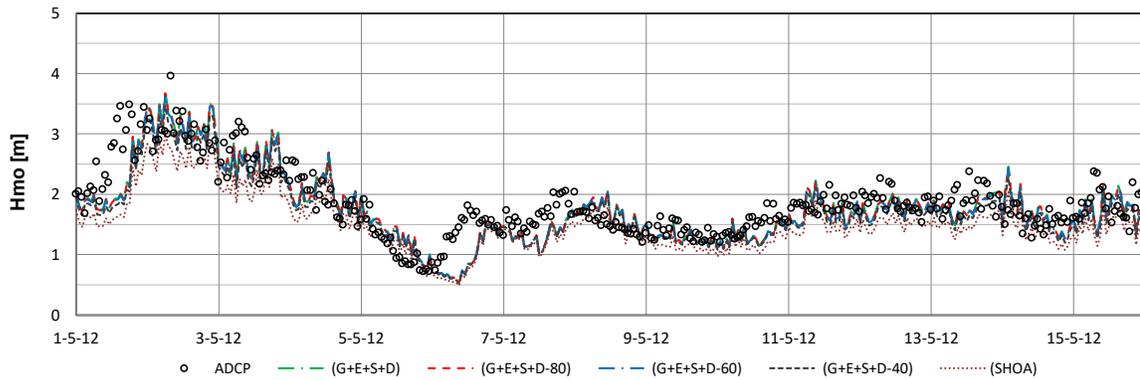
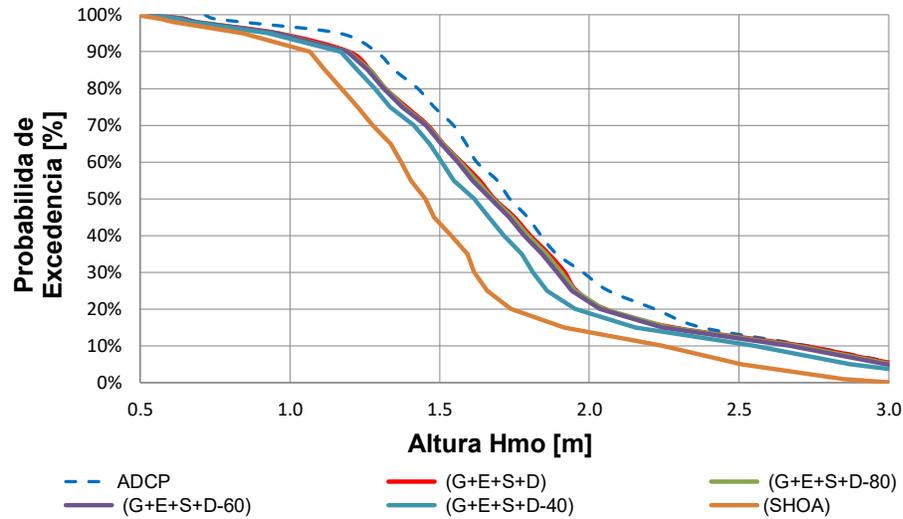
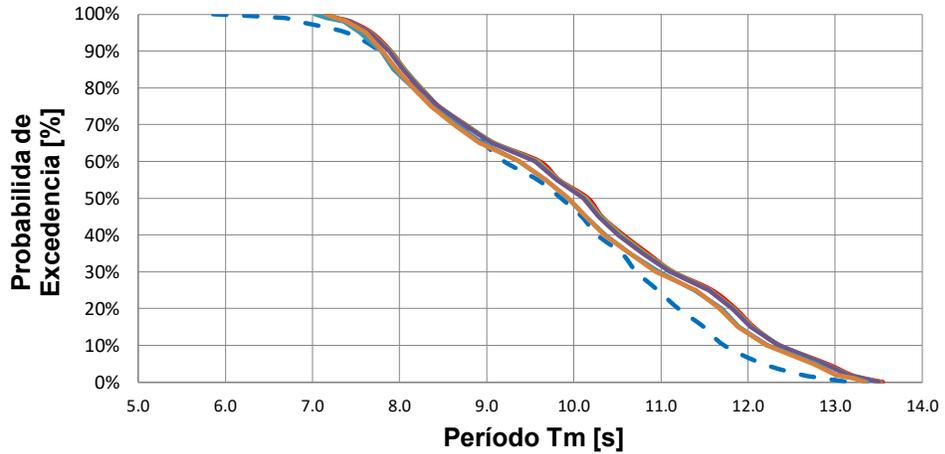


Figura 6-4 Parámetros estadísticos, probabilidad de excedencia y serie de tiempo (Hmo), de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Curaumilla. Fuente: Elaboración Propia.

	Parámetro	(G+E+S+D)	(G+E+S+D-80)	(G+E+S+D-60)	(G+E+S+D-40)	(SHOA)
Tm [s]	Media	10.09	10.07	10.05	9.93	9.93
	Sesgo	0.34	0.32	0.30	0.18	0.18
	RMSE	0.95	0.94	0.93	0.91	0.89
	Dif%	-3.7%	3.6%	3.4%	2.1%	2.1%



— ADCP — (G+E+S+D) — (G+E+S+D-80) — (G+E+S+D-60) — (G+E+S+D-40) — (SHOA)

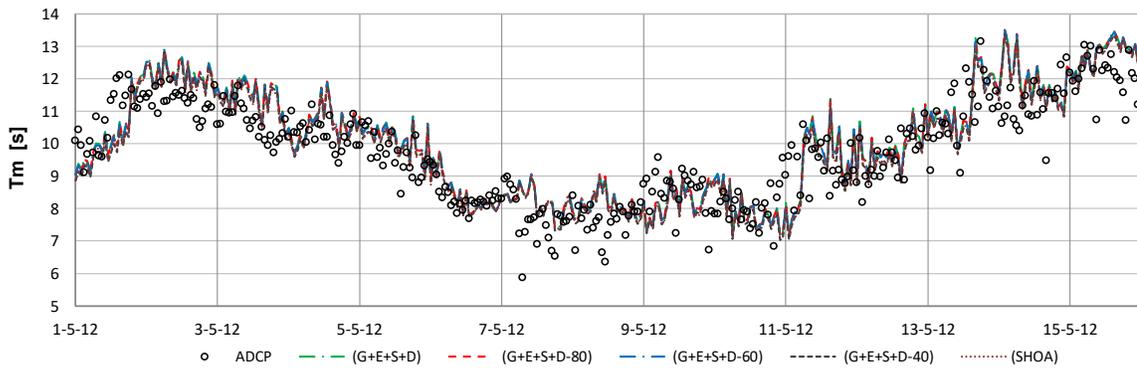


Figura 6-5 Parámetros estadísticos, probabilidad de excedencia y serie de tiempo (T_m), de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Curaumilla. Fuente: Elaboración Propia.

	Parámetro	(G+E+S+D)	(G+E+S+D-80)	(G+E+S+D-60)	(G+E+S+D-40)	(SHOA)
Dm [°]	Media	249	250	250	250	251
	Sesgo	3.58	3.66	3.87	4.43	5.41
	RMSE	6.55	6.60	6.70	7.00	7.54
	Dif%	1.5%	1.5%	1.6%	1.8%	2.3%

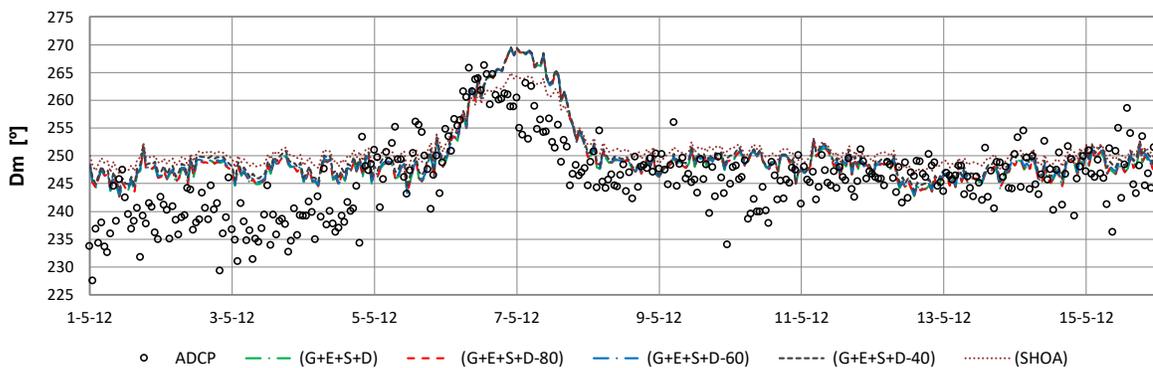
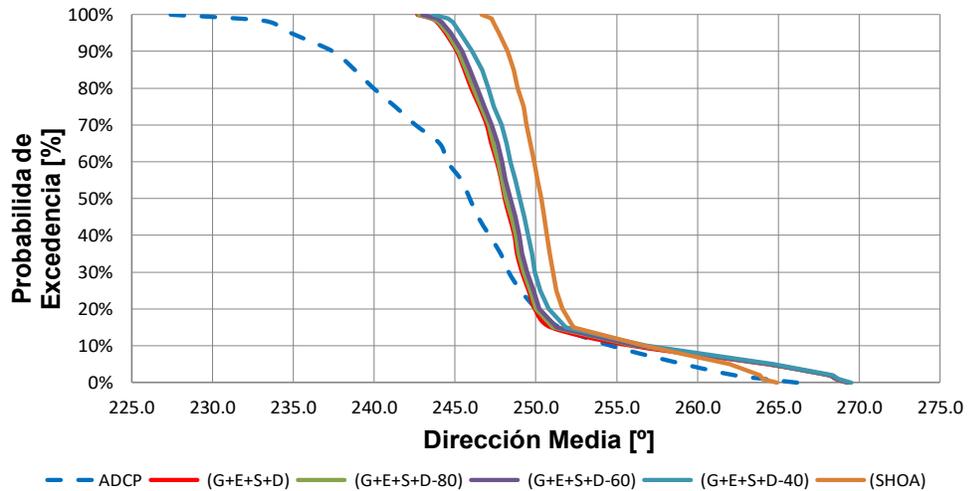


Figura 6-6 Parámetros estadísticos, probabilidad de excedencia y serie de tiempo (Dm), de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Curaumilla. Fuente: Elaboración Propia.

Se puede inferir que el desempeño de los modelos varía dependiendo de la información de sondeos empleados para construir la superficie batimétrica. A medida que se incluyen sondeos a partir del veril -60 (específicamente en los escenarios 1,2 y 3) se producen mejoras en la capacidad predictiva de los modelos, como lo indica el descenso del sesgo de la altura significativa y la dirección media.

El escenario 5 que incluye batimetría de cartas náuticas SHOA, predice las alturas y direcciones con un mayor error. En cambio, para el periodo medio ocurre lo contrario, ya que los escenarios que incluyen solo sondeos de las cartas náuticas del SHOA y de detalle hasta el veril -40, tienden a predecir con un menor error los registros de terreno.

En todos los escenarios batimétricos, las predicciones de las alturas significativas, en el modelo, tienden a subestimar los registros, mientras que, para las direcciones medias, el cálculo de estas tiende a ser mayor que las medidas por el ADCP. Para los periodos medios se observa una leve sobreestimación para todos los escenarios, comparada con los demás estadígrafos.

6.2.2 LEBU

Al igual que para Curaumilla, en general las modelaciones de los escenarios batimétricos logran reproducir con precisión del oleaje en la zona de Lebu. Para describir el comportamiento de los escenarios batimétricos respecto a las mediciones de campo, en la Figura 6-7, Figura 6-8 y Figura 6-9, se muestran las tablas que resumen los cálculos del error estadístico, gráficas de probabilidad de excedencia y la serie de tiempo, para cada estadígrafo del oleaje, H_m , T_m , D_m , respectivamente.

En la estimación del parámetro H_m , al usar distinta información batimétrica y considerar menos densidad de sondajes batimétricos en la zona de detalle. Se observa una diferencia porcentual del 5% y un error promedio del 0.06 [m] entre el escenario que mejor predice las alturas y el que menor lo hace, siendo en esta oportunidad el escenario 4, que incluye batimetría de detalle hasta el veril -40. El análisis indica que todos los escenarios sobreestiman las alturas, existiendo un quiebre en la tendencia del modelo para alturas mayores a 1.6 [m]. Este quiebre refleja un mayor acercamiento al comportamiento de los datos de campo, lo cual se refleja en la gráfica de la probabilidad de excedencia y en la serie de tiempo de H_m .

En cuanto al error de estimación del T_m , se observa que los modelos se comportan de manera y similar para todos los escenarios batimétricos, existiendo una sobreestimación generalizada para los periodos de la data. En los 5 escenarios las diferencias observadas entre el modelo y las mediciones de campo son en promedio del 23%, exceptuando la modelación del escenario que incluye batimetría de detalle hasta el veril de -40, el cual supera la diferencia porcentual con un 25% y un error cuadrático medio cercano a 2.2 [s].

Se observa una marcada tendencia de los modelos a calcular direcciones menores a las de campo, en toda la serie de tiempo. Para direcciones mayores a 290° , asociadas a una probabilidad de excedencia menor al 20%, los escenarios tienden a lograr un mejor ajuste en la medida que los escenarios batimétricos incluyen más información de detalle.

El sesgo está en el rango de 10.22° y 12.15° , mientras que el error cuadrático medio, está en el rango 11.37° y 13.1° , para el escenario que tiene mayor detalle de sondajes y que se ajusta mejor a los datos de campo, y el que incluye solamente sondajes de las cartas náuticas, que corresponde al que tiene un mayor error asociado a las mediciones del ADCP, respectivamente.

	Parámetro	(G+E+S+D)	(G+E+S+D-80)	(G+E+S+D-60)	(G+E+S+D-40)	(SHOA)
Hmo [m]	Promedio	1.39	1.39	1.39	1.45	1.43
	Sesgo	0.11	0.11	0.11	0.17	0.15
	RMSE	0.29	0.29	0.29	0.34	0.32
	Dif%	13.3%	13.2%	13.0%	18.2%	16.3%

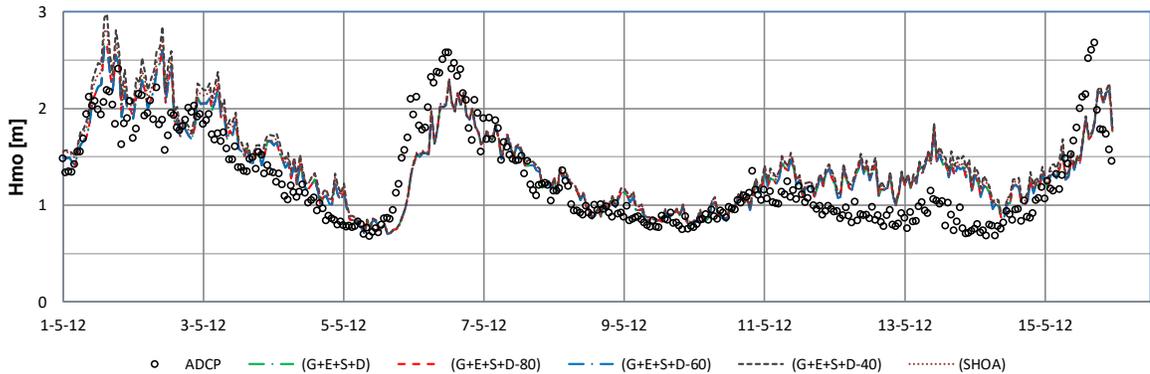
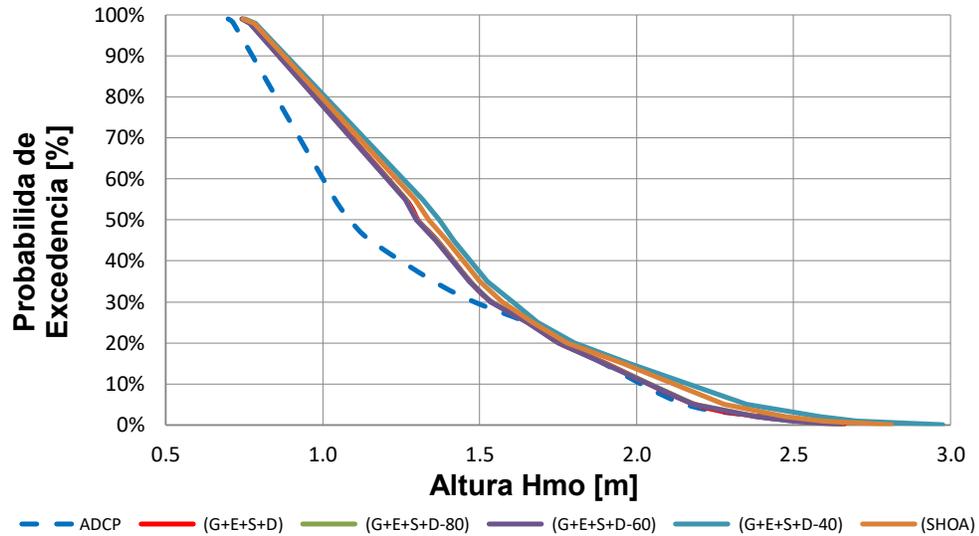


Figura 6-7 Parámetros estadísticos, probabilidad de excedencia y serie de tiempo (Hmo), de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

	Parámetro	(G+E+S+D)	(G+E+S+D-80)	(G+E+S+D-60)	(G+E+S+D-40)	(SHOA)
Tm [s]	Media	10.09	10.07	10.05	9.93	9.93
	Sesgo	0.34	0.32	0.30	0.18	0.18
	RMSE	0.95	0.94	0.93	0.91	0.89
	Dif%	-3.7%	3.6%	3.4%	2.1%	2.1%

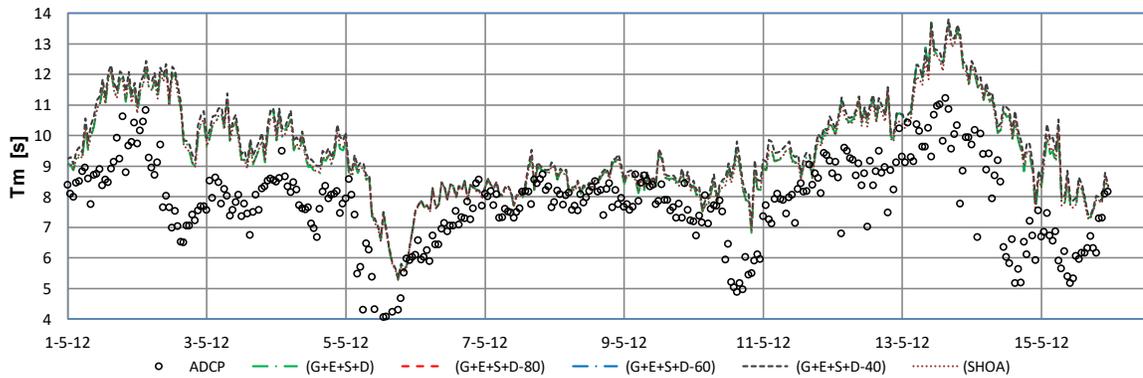
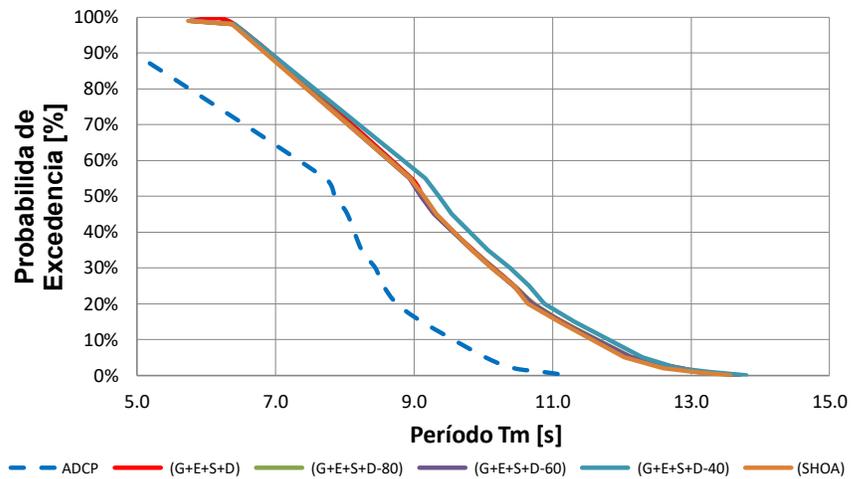


Figura 6-8 Parámetros estadísticos, probabilidad de excedencia y serie de tiempo (Tm) de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

	Parámetro	(G+E+S+D)	(G+E+S+D-80)	(G+E+S+D-60)	(G+E+S+D-40)	(SHOA)
Dm [°]	Promedio	284	284	284	284	282
	Sesgo	-10.22	-10.24	-10.28	-10.43	-12.15
	RMSE	11.37	11.39	11.41	11.51	13.10
	Dif%	-3.5%	-3.5%	-3.5%	-3.5%	-4.1%

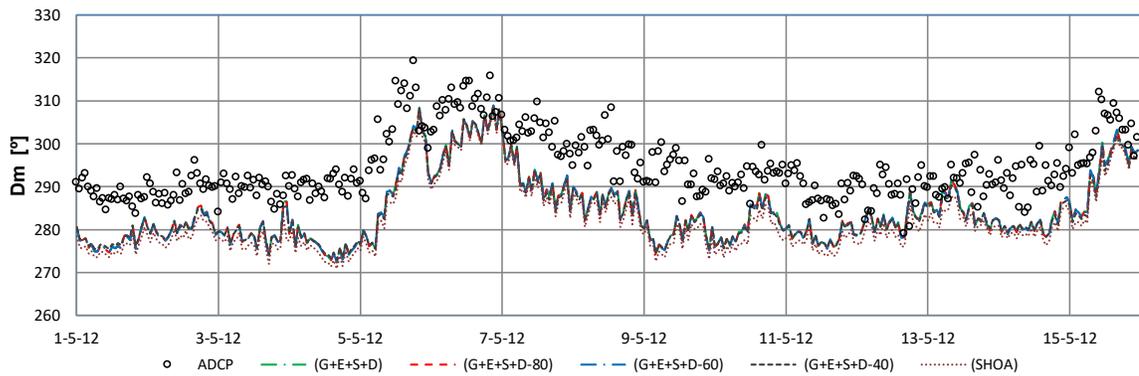
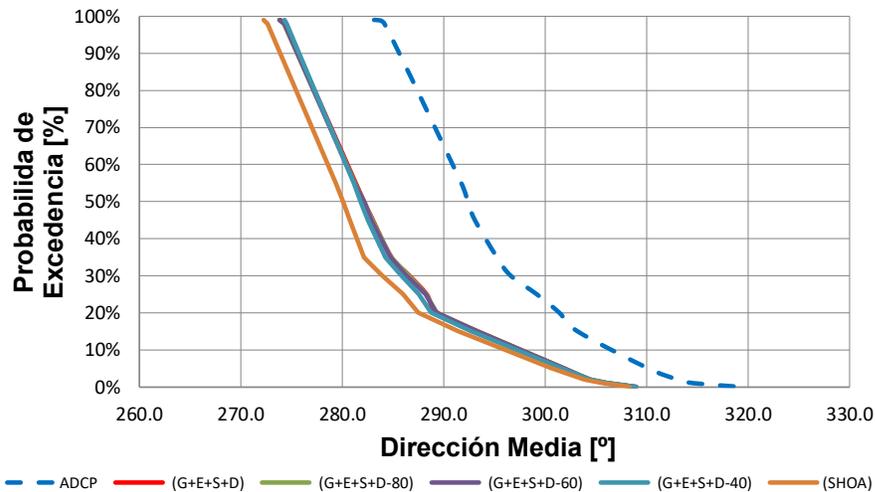


Figura 6-9 Parámetros estadísticos, probabilidad de excedencia y serie de tiempo (Dm), de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

El desempeño de los modelos de los escenarios batimétricos de la zona de Lebu, al igual que para Curaumilla, se ve afectado por la información de sondajes empleados para construir la superficie batimétrica. A medida que se incluyen sondajes a partir del veril -60, específicamente en los escenarios 1,2 y 3, se producen mejoras en la capacidad predictiva de los modelos, como lo indica el descenso del sesgo en las figuras, para el cálculo de la altura significativa y dirección media.

El escenario 4 que incluye batimetría de detalle hasta el veril -40, predice las alturas y periodos con un mayor error. En cambio, para el estadígrafo de direcciones medias, el escenario que incluye solo sondajes de las cartas náuticas del SHOA, predice con un mayor error los registros de terreno.

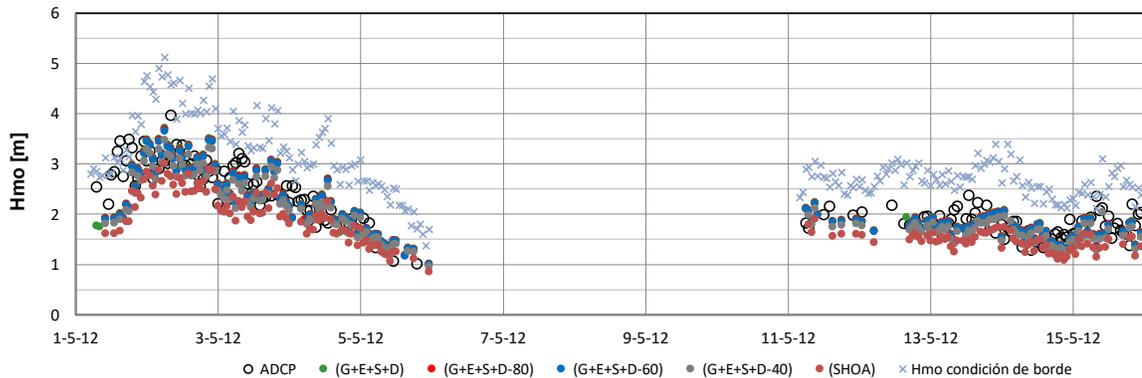
En todos los escenarios batimétricos, las predicciones de las alturas significativas y periodos medio tienden a sobreestimar los valores, mientras que, para las direcciones medias, la predicción genera direcciones menores.

6.2.3 ANÁLISIS DE PARÁMETROS ESTADÍGRAFOS PARA PERÍODOS ENTRE 10-13 [S]

Al realizar un análisis de los periodos de las series de tiempo de ambas localidades, se observa que los periodos varían en su mayoría entre los 7 y 14 [s]. Al analizar los T_m entre 7 y 14 [s] de los 5 casos estudiados, se observa que del total de la serie de Curaumilla existe un 68% que se encuentran entre los 7 - 10 [s], un 30% que varía entre 10 - 13 [s] y tan solo un 2% que es mayor a 13 [s]. En cambio, para Lebu, los periodos se agrupan en su mayoría entre 7 - 13[s] con un 96%, solo un 4% son periodos mayores a 13 [s].

Para evaluar la influencia de la batimetría en los resultados de la propagación espectral de oleaje, se comparan los datos medidos con ADCP respecto a los valores modelados de los 5 escenarios batimétricos. Para este análisis sólo se consideran los periodos en el rango 10-13 [s] para cuantificar la incidencia de la batimetría de entrada sobre los resultados, considerando que son los periodos que sufren mayores transformaciones físicas en la zona de estudio, debido a la interacción de la ola con el fondo marino.

Se analizan las series de tiempo los estadígrafos H_{mo} , T_m y D_m , en dicho rango tal como se muestra en la



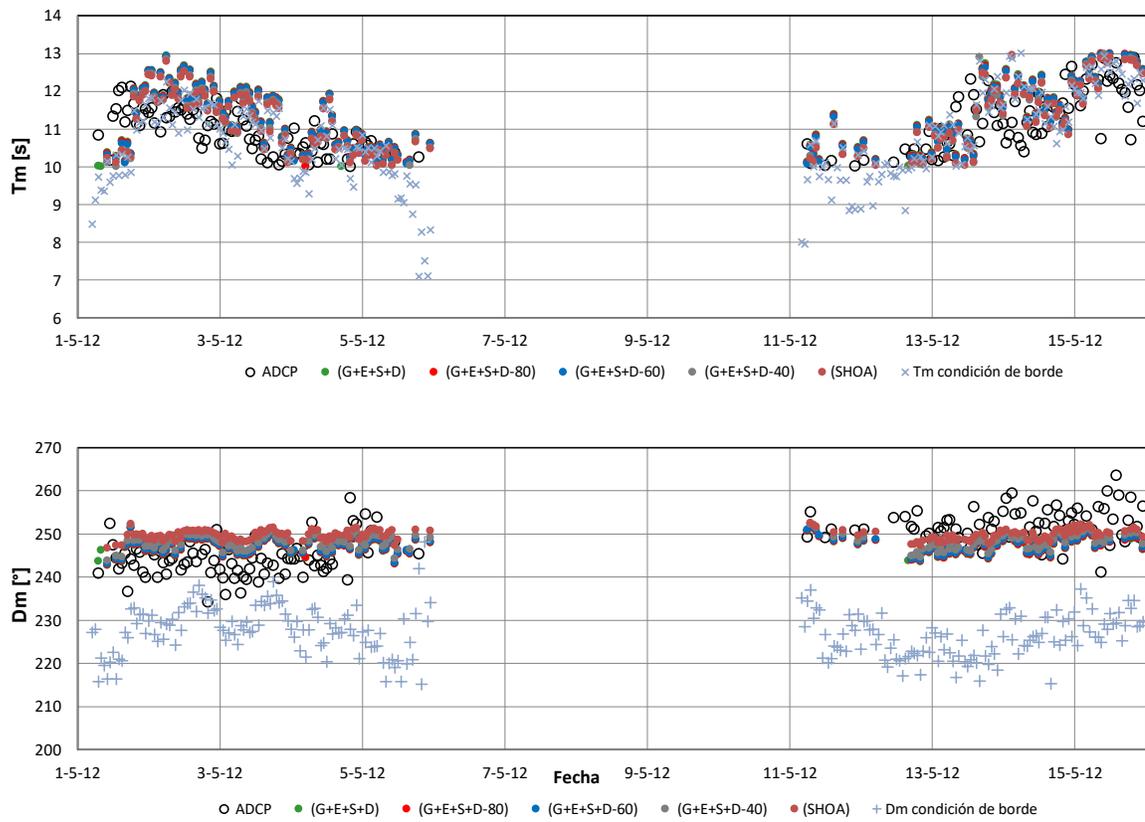


Figura 6-10 y Figura 6-11, para Curaumilla y Lebu respectivamente. En ambas figuras se grafican los resultados de las modelaciones de los escenarios batimétricos, además de los datos de entrada en la condición de borde (mediciones boya) y los valores registrados con el ADCP.

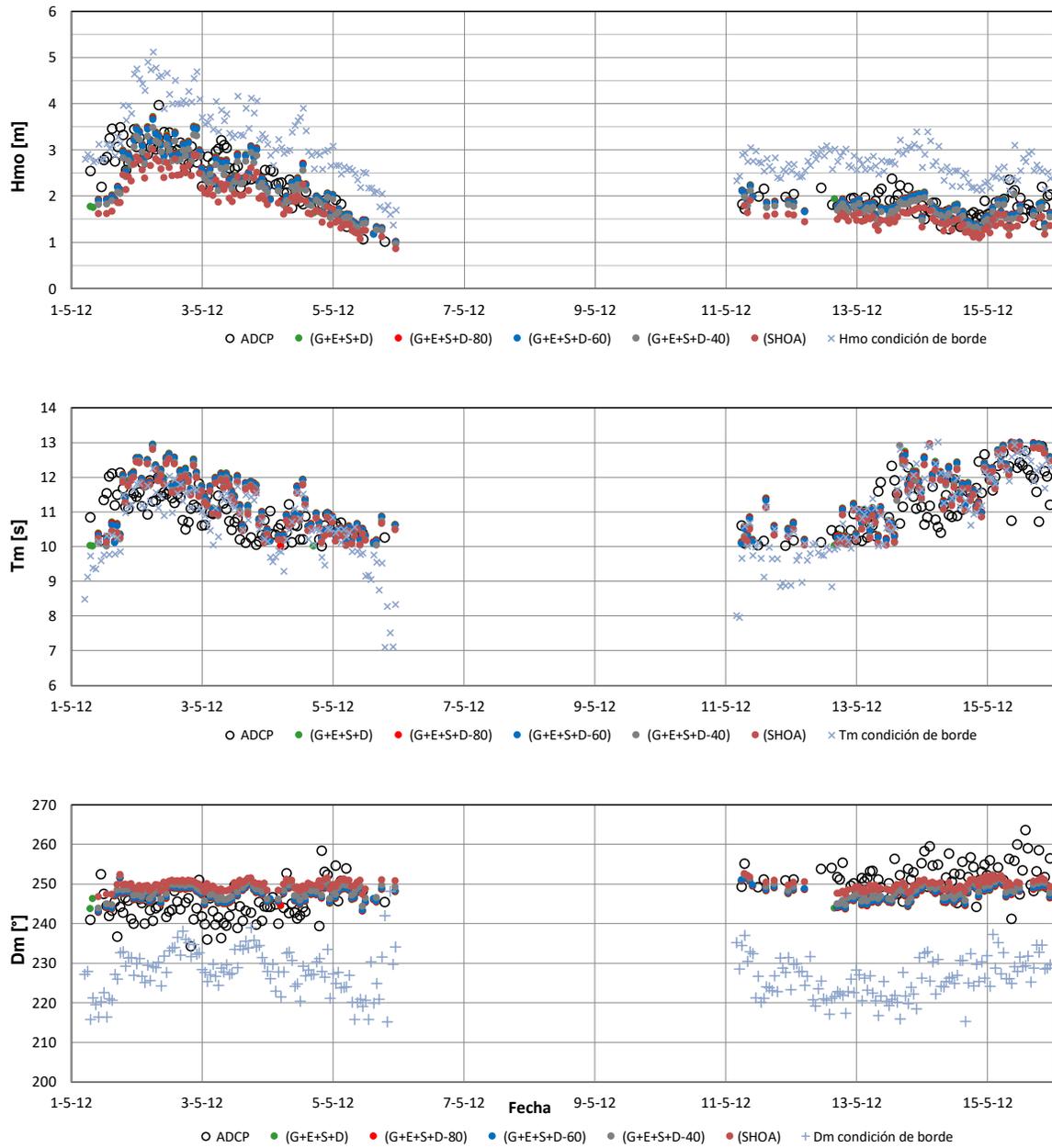


Figura 6-10 Serie de tiempo de (Hmo, Tm, Dm) para el análisis de periodos entre 10 y 13 [s], de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Curaumilla. Fuente: Elaboración propia.

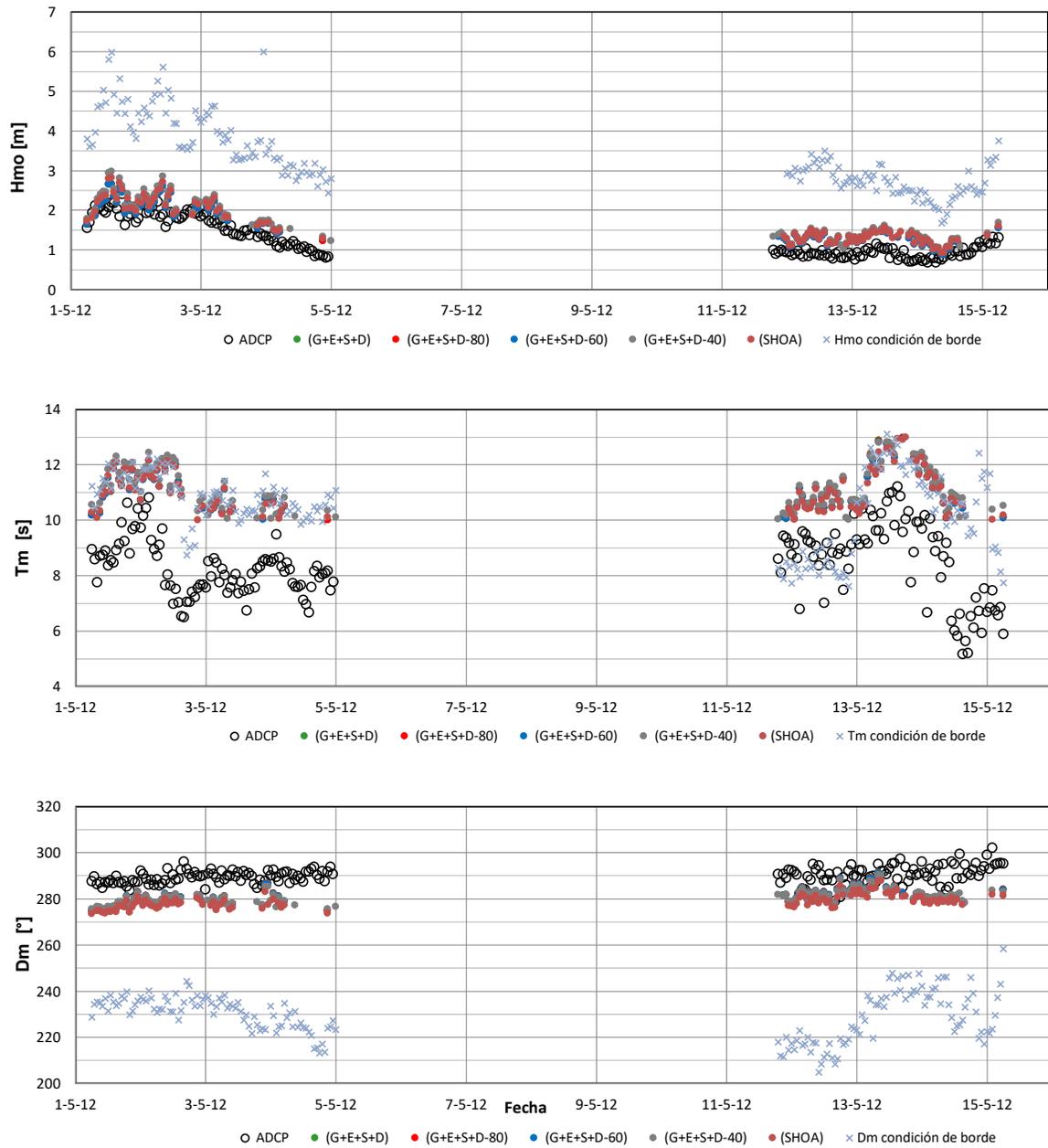


Figura 6-11 Serie de tiempo de (Hmo, Tm, Dm) para el análisis de periodos entre 10 y 13 [s], de escenarios batimétricos respecto a ADCP, Lebu. Fuente: Elaboración propia.

En relación al error en la estimación del parámetro H_{m0} , evaluado en los 5 escenarios batimétricos modelados, se aprecia una tendencia generalizada de los escenarios a subestimar los valores respecto al ADCP en Curaumilla y sobrestimar los valores de medición del ADCP en Lebu. Respecto de la influencia de los escenarios batimétricos en las alturas significativas modeladas, no es posible identificar un nivel de resolución batimétrica que permita mejorar el ajuste de los datos.

En cuanto al comportamiento del periodo medio espectral (T_m), se observan diferencias para las localidades de interés. En Curaumilla donde el oleaje es caracterizado mayormente por periodos sobre los 10 [s], hay un mejor ajuste para el caso de Lebu donde los periodos más frecuentes no superan los 10 [s] y tienen mayor dispersión.

Respecto de la dirección media del oleaje (D_m), se observa que los datos de campo indican en general un oleaje proveniente de las direcciones WSW para Curaumilla y WNW para Lebu. Al evaluar el estadígrafo modelado de dirección del oleaje (D_m), se aprecia que en el caso de Curaumilla se logra un mayor ajuste que en Lebu. Esto se puede deber a que el modelo no logra reproducir certeramente, las direcciones provenientes del cuarto cuadrante.

Se observa que, para ambas zonas de estudio, las alturas en la condición de borde son mayores que las mediciones del ADCP, en toda la serie de tiempo. A diferencia de lo que ocurre con las direcciones, donde las asociadas a la condición de borde provienen de direcciones menores a las medidas en aguas someras. En la caracterización de Lebu, respecto a la dirección media, se aprecia una mayor dispersión de los resultados, lo cual también es predecible, considerando que el dominio cuenta con una zona de sombra.

6.3 DISPERSIÓN DE LOS RESULTADOS EN PERFILES TRANSVERSALES A LA LÍNEA DE COSTA

En esta sección se evalúa la diferencia espacial de los resultados obtenidos de las modelaciones espectrales de oleaje, respecto de los distintos escenarios batimétricos de entrada al modelo. En dos secciones transversales a la línea de costa, se obtienen los parámetros estadísticos del oleaje; Hmo, Tm, Dm, en puntos específicos ubicados sobre los veriles -20, -40, -60, -80 y 100 , ver Figura 6-12 y Figura 6-16, de manera de verificar para qué profundidad es más sensible un cambio batimétrico.

Para tal efecto, en cada punto definido sobre los perfiles transversales a la línea de costa, se calcula el promedio temporal de los valores mínimo, promedio y máximo de los parámetros estadísticos; Hmo, Tm y Dm que resultan de las distintas modelaciones de escenarios batimétricos. Esta metodología se aplica a Curaumilla y Lebu.

6.3.1 CURAUMILLA

Para la zona de Curaumilla se consideran dos perfiles transversales a la línea de costa, denominados Norte y Sur, Figura 6-12, los cuales incluyen puntos a analizar sobre los veriles -20, -40, 60, -80 y -100.

En la columna izquierda se grafican los promedios temporales de los valores mínimo, promedio y máximo de los parámetros estadísticos; Hmo, Tm y Dm, que resultan de las distintas modelaciones de escenarios batimétricos. A modo de referencia se incluye el promedio temporal de los parámetros espectrales obtenidos del ADCP. En la columna derecha, se grafica la dispersión mínima, máxima y promedio de los resultados de escenarios batimétricos, respecto a la profundidad de cada uno de los veriles analizados.

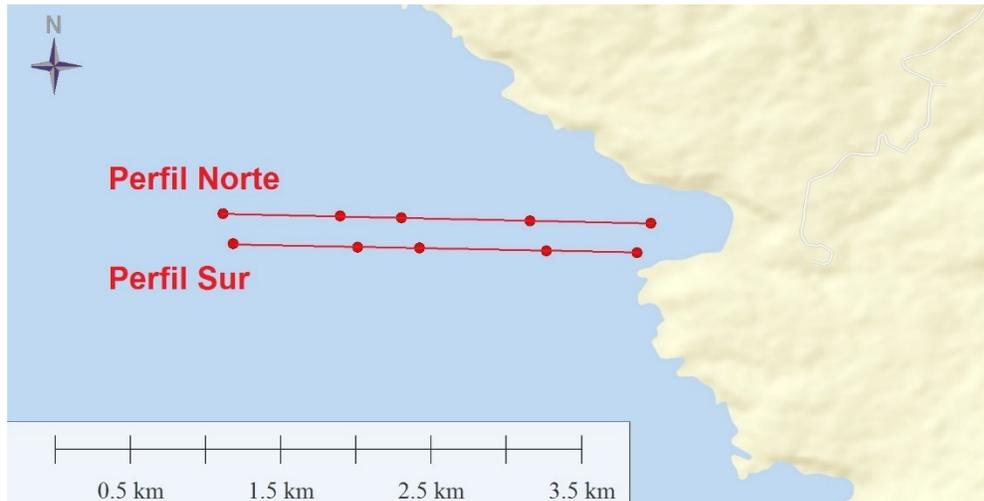


Figura 6-12 Perfiles Transversales a la línea de costa, Curaumilla. Fuente: Elaboración Propia.

En la gráfica Figura 6-13 se observa un aumento en la dispersión entre los estadígrafos del oleaje modelados H_{mo} , T_m y D_m , a medida que los veriles son menos profundos.

La dispersión de resultados de altura significativa tiene un comportamiento uniforme, en el Perfil Norte, para profundidades sobre los 60 [m], cuyo valor máximo alcanza valores cercanos a 0.15 [m]. Para profundidades menores a 40 [m], la dispersión máxima es aproximadamente de 0.3 [m], no obstante, el promedio permanece cercano a los 0.1 [m]. En el Perfil Sur, las dispersiones mínima y promedio tienen un comportamiento semejante al observado en el Perfil Norte, sin embargo, la dispersión máxima de resultados crece casi de manera lineal desde el veril -100 hasta el -20, entre 0.12 [m] y 0.3 [m] aproximadamente.

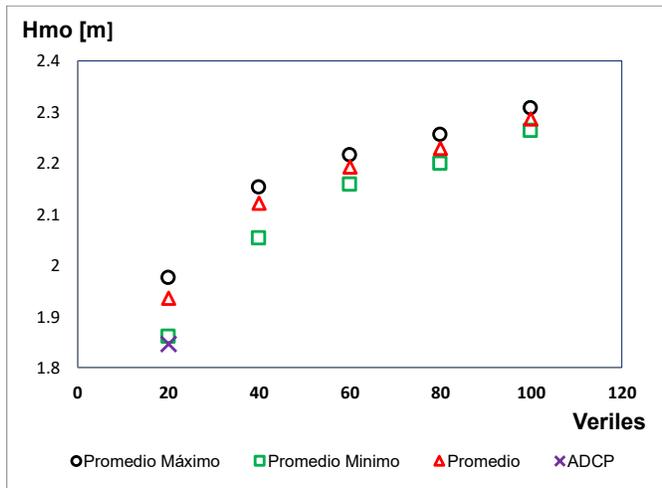
La dispersión de los resultados obtenidos para el periodo medio presenta similar comportamiento para los perfiles Norte y Sur, alcanzando el valor máximo en el veril -20 con 0.8 [s], mientras que en el veril -40 este valor no supera los 0.5 [s]. Los veriles de mayor profundidad, la dispersión máxima no supera de los 0.3 [s]. En promedio la dispersión no supera los 0.4 [s], para los 5 veriles en ambos perfiles.

Los promedios temporales mínimos, promedio y máximos de las alturas significativas y periodos medios, alcanzan valores muy cercanos para los perfiles Norte y Sur.

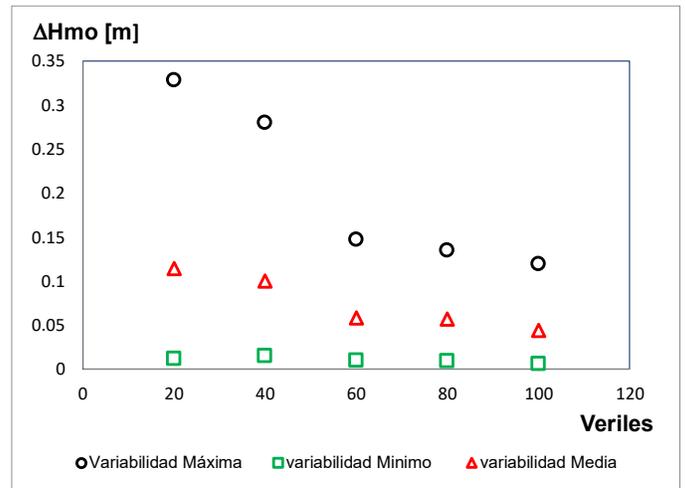
La dispersiones mínima, media y máxima de la dirección media, entre los veriles -40 y -100 presenta un comportamiento muy similar al comparar los perfiles Norte y Sur, con diferencias máximas menores a 5° . Las mayores variaciones se producen en el veril -20 de ambos perfiles, donde se obtiene una dispersión máxima para el perfil Norte, cercana a 13° , alcanzando más del doble del valor obtenido en el Perfil Sur, cercano a los 5° .

El comportamiento de los promedios temporales para el perfil Norte no varía en cuanto a los máximos, mínimos y promedios. El rango de diferencia entre los parámetros estadísticos analizados no supera los 5° , con direcciones de olas provenientes de WSW para todos los veriles del perfil. Para el perfil Sur, las direcciones se comportan de manera semejante a lo ocurrido en el perfil Norte en los veriles analizados, respecto a los promedios máximos y mínimos, exceptuado lo ocurrido en el veril -20 donde los promedios de las alturas máximas provienen del SW, con direcciones cercanas a los 260° .

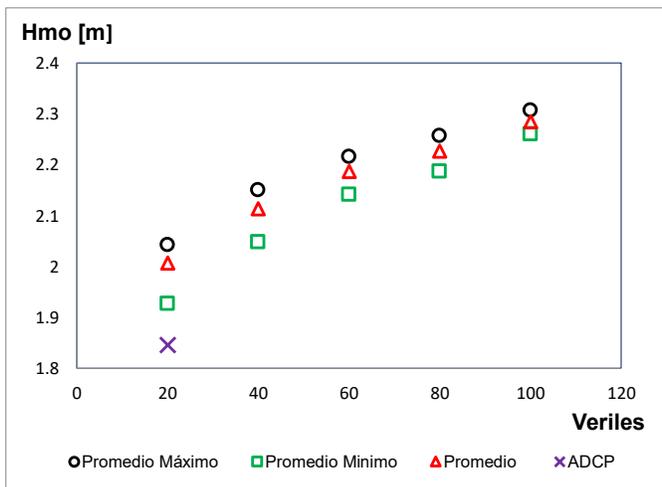
La semejanza del comportamiento de los perfiles, se debe a la cercanía en longitud que tienen los perfiles Norte y Sur, se seleccionan perfiles a poca distancia, ya que uno de los propósitos, es representar el comportamiento de los escenarios batimétricos en cercanías de las mediciones de campo del ADCP.



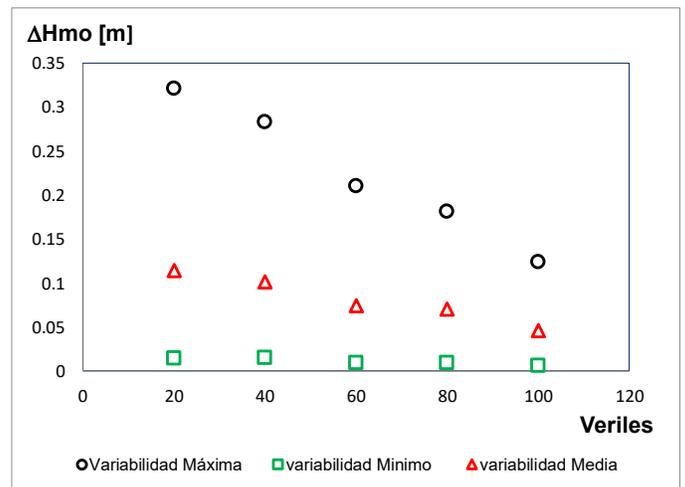
a) Promedio Temporal Perfil Norte



b) Dispersión Perfil Norte



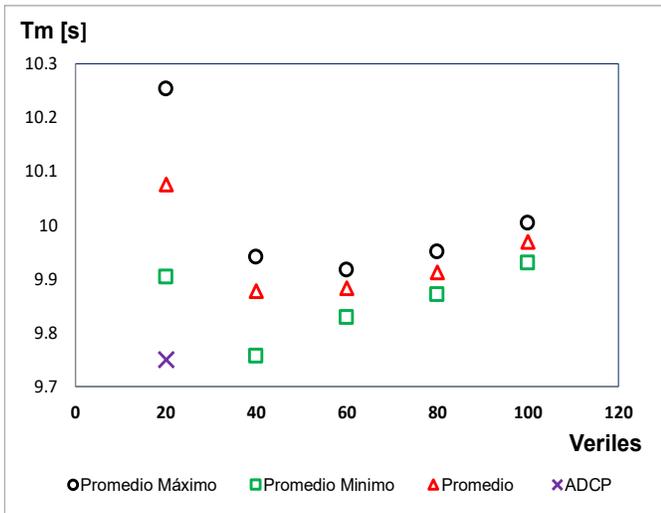
c) Promedio Temporal Perfil Sur



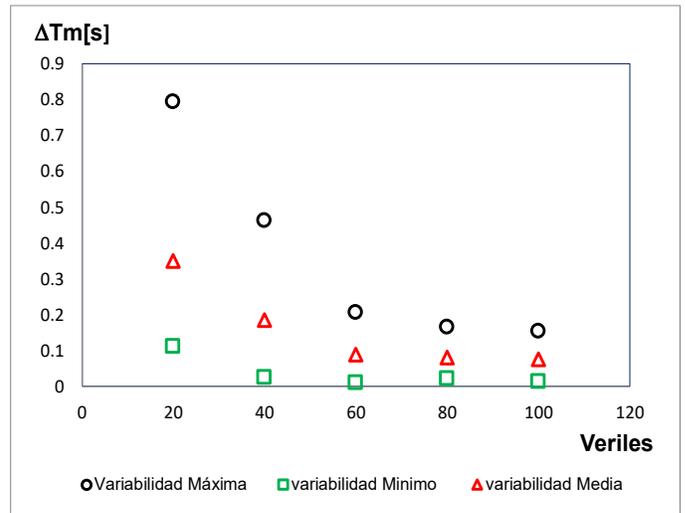
d) Dispersión Perfil Sur

Figura 6-13 Promedio temporal mínimo, máximo y promedio; Dispersión mínima, máxima y promedio de las alturas significativa (Hmo) de la serie, para perfiles Norte y Sur, Curaumilla.

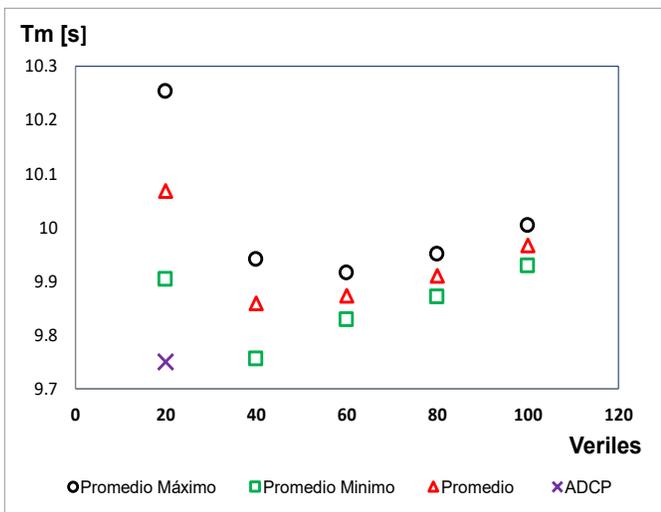
Fuente: Elaboración Propia.



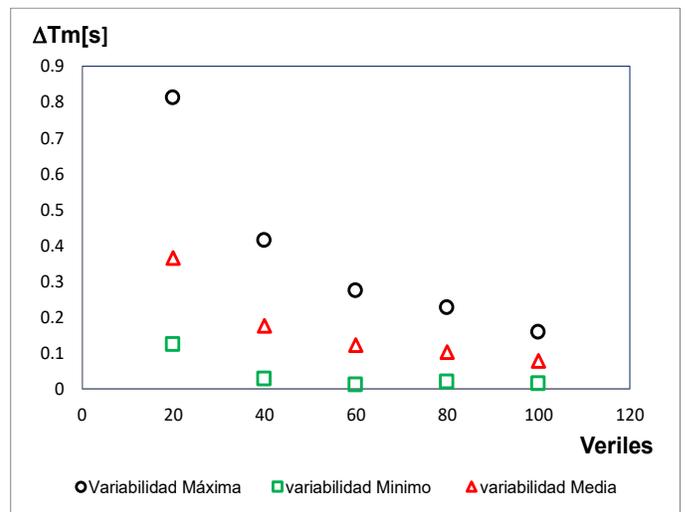
a) Promedio Temporal Perfil Norte



b) Dispersión Perfil Norte



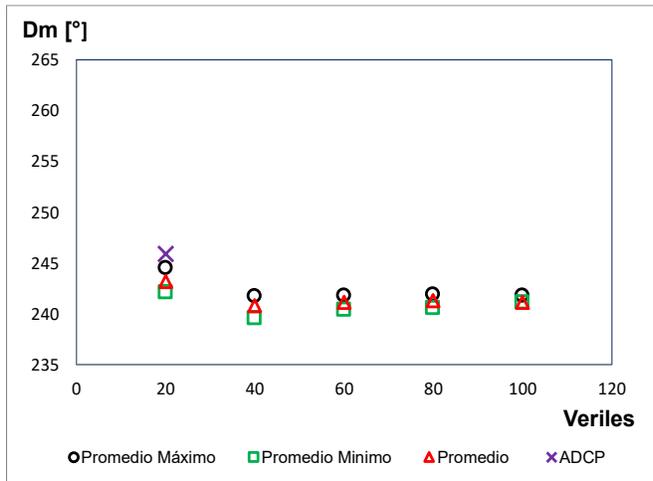
c) Promedio Temporal Perfil Sur



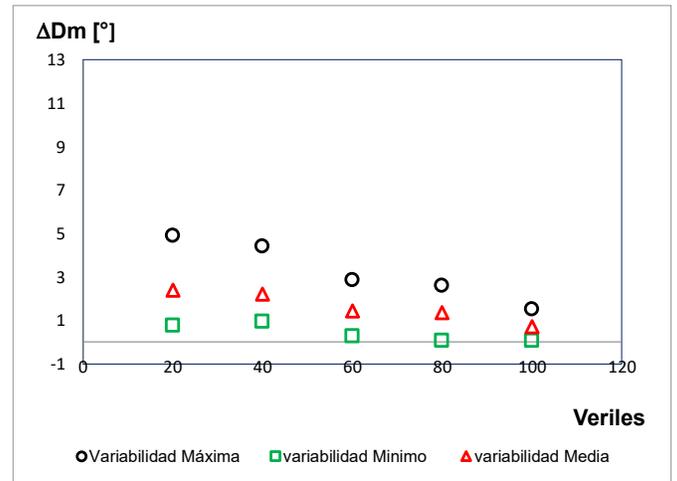
d) Dispersión Perfil Sur

Figura 6-14 Promedio temporal mínimo, máximo y promedio; Dispersión mínima, máxima y promedio de los periodos medios (T_m) de la serie, para perfiles Norte y Sur, Curaumilla.

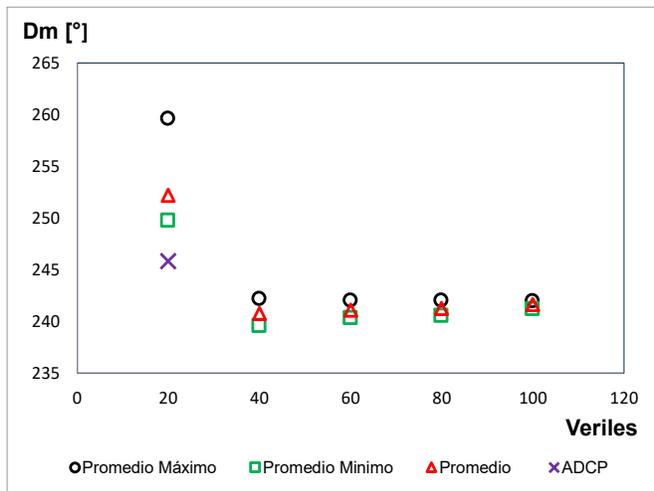
Fuente: Elaboración Propia.



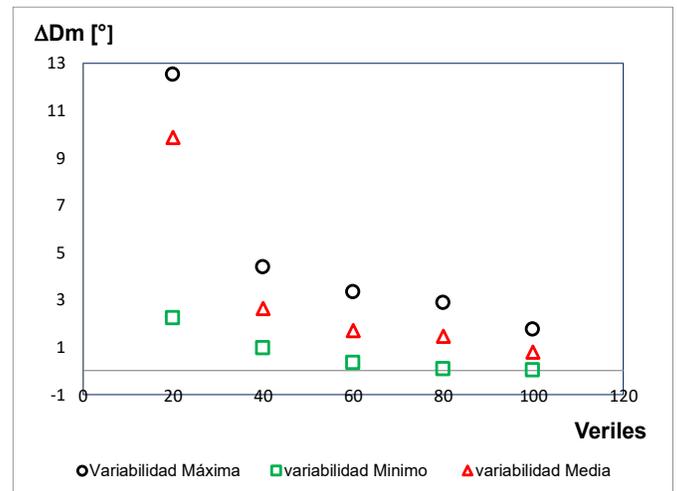
a) Promedio Temporal Perfil Norte



b) Dispersión Perfil Norte



c) Promedio Temporal Perfil Sur



d) Dispersión Perfil Sur

Figura 6-15 Promedio temporal mínimo, máximo y promedio; Dispersión mínima, máxima y promedio de las alturas medias (Dm) de la serie, para perfiles Norte y Sur, Curaumilla. Fuente: Elaboración Propia.

6.3.2 LEBU

Para la zona de Lebu, se consideran tres perfiles transversales a la línea de costa, denominados Norte, Centro y Sur, Figura 6-16, los cuales incluyen puntos sobre los veriles -20, -40, -60, -80 y -100 metros.

En la columna izquierda de la Figura 6-17, Figura 6-18 y Figura 6-19, se grafican los promedios temporales de los valores mínimo, promedio y máximo de los parámetros estadísticos H_{mo} , T_m y D_m , que resultan de las distintas modelaciones de escenarios batimétricos, versus la profundidad, para cada uno de los puntos de comparación en el perfil transversal.

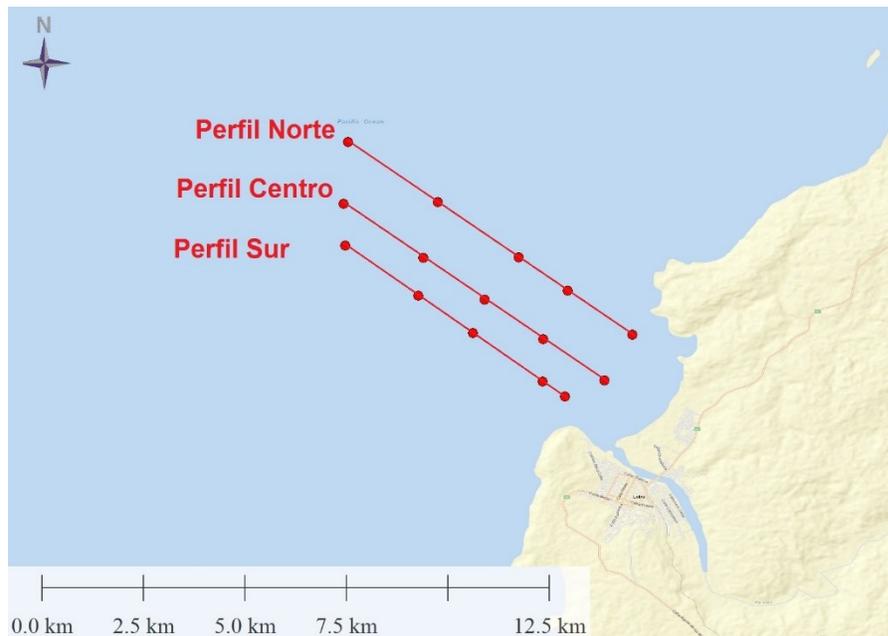


Figura 6-16 Perfiles Transversales a la línea de costa, Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

Se puede constatar que se produce un aumento en la dispersión entre los estadígrafos del oleaje modelado, a medida que el oleaje se acerca a aguas someras.

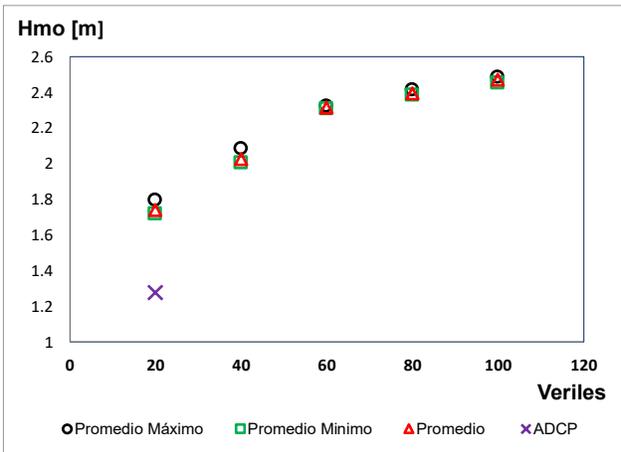
La dispersión de resultados de altura significativa tiene un comportamiento relativamente diferente en cuanto a los valores máximos promedios, en los perfiles Norte, Centro y Sur, para profundidades sobre los 60 [m]. Este comportamiento alcanza valores máximos en el perfil Norte cercanos a 0.20 [m] y máximos de 0.10 [m] en el perfil Sur y en promedio cercano a los

0.04 [m]. Para los perfiles Norte y Centro, la máxima altura de los promedios crece, a medida que los veriles se hacen menos profundos, en cambio para el perfil Sur se produce un salto en los máximos promedios para los veriles -40 y -20, respecto a las profundidades sobre el veril -60.

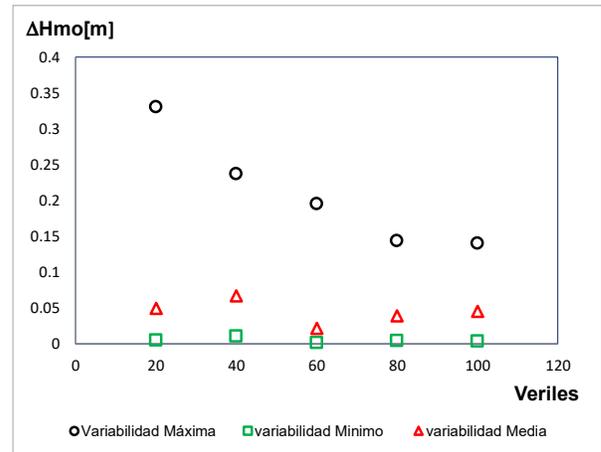
La dispersión de los resultados para el periodo medio T_m , presenta similar comportamiento para los perfiles Norte, Centro y Sur, en cuanto al promedio temporal y la dispersión. En el veril -20, la dispersión máxima alcanza un valor de cercano a 0.5 [s] en el perfil Sur, y a 0.7 [s] en los perfiles Centro y Norte. Para profundidades mayores a -60, la dispersión máxima no pasa de los 0.45 [s]. En promedio la dispersión no supera los 0.3 [s], en ninguno de los perfiles. Los promedios temporales de las alturas significativas mínima, promedio y máxima alcanzan valores muy cercanos en los tres perfiles, el rango para los tres promedios varía entre los 9.5 y 10 [s]

La dispersión de resultados de dirección media tiene un comportamiento relativamente diferente, en cuanto a los valores máximos promedios, en los perfiles Norte, Centro y Sur. Este comportamiento alcanza valores máximos en el perfil Norte sobre los 7° para los veriles -20, -40 y el promedio de las dispersiones corresponde a 1.6° . Para los perfiles Sur y Centro, la dispersión temporal de máximas direcciones bordea los 5° y el promedio de las dispersiones es mejor a 1.4° . En general, el perfil Norte presenta mayores dispersiones en los promedios evaluados.

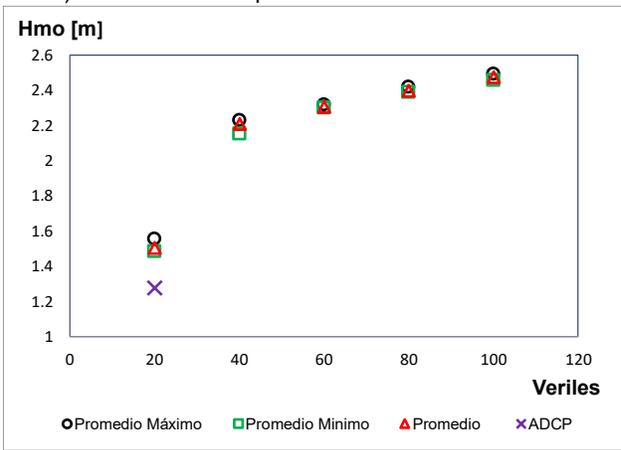
El comportamiento de los promedios temporales mínimos, máximos y promedios, es similar para los tres perfiles. Para el veril -100 los promedios de las direcciones corresponden a olas provenientes del WSW, y para el veril -20 las direcciones en promedio corresponden a olas provenientes del W. El comportamiento de las direcciones, para los escenarios, indica que las olas a medida que se acercan a profundidades menores, se comienzan a propagar en dirección paralela a la costa, producto de la refracción.



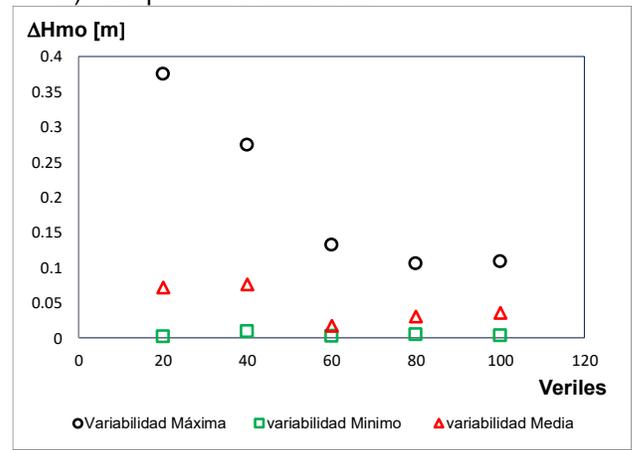
a) Promedio Temporal Perfil Norte



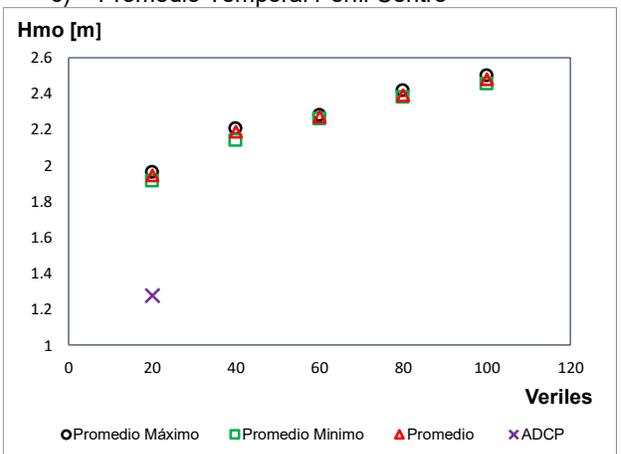
b) Dispersión Perfil Norte



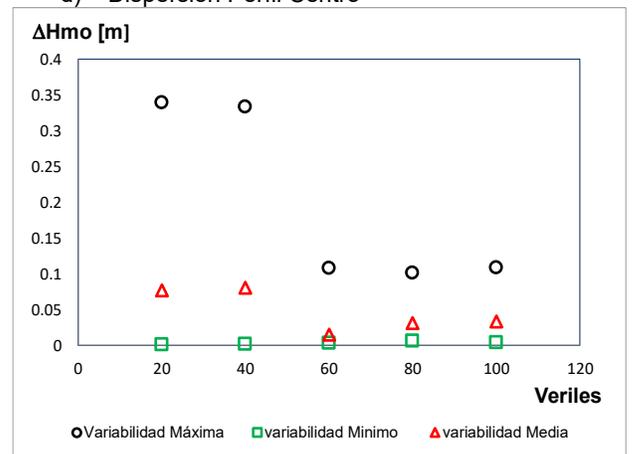
c) Promedio Temporal Perfil Centro



d) Dispersión Perfil Centro

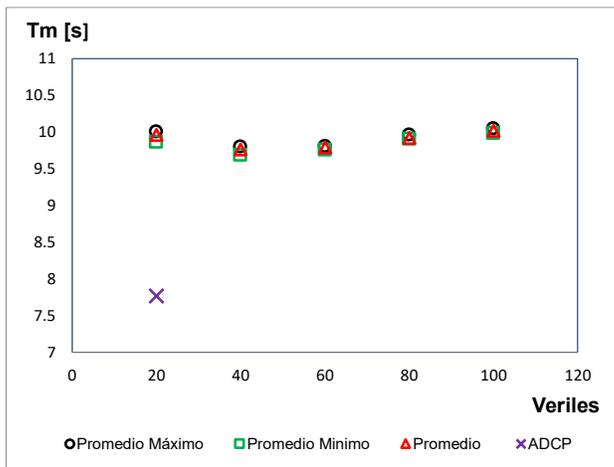


e) Promedio Temporal Perfil Sur

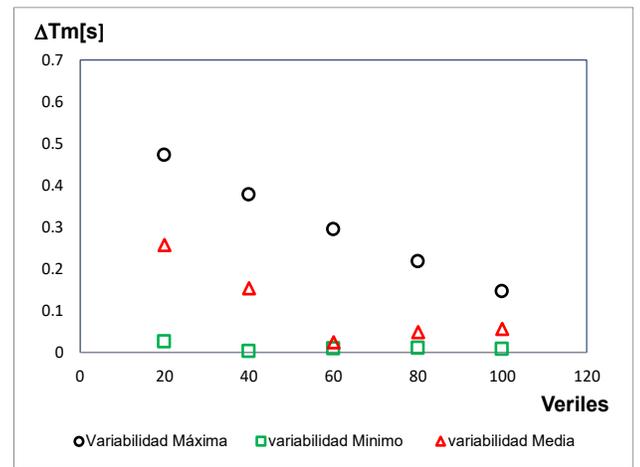


f) Dispersión Perfil Sur

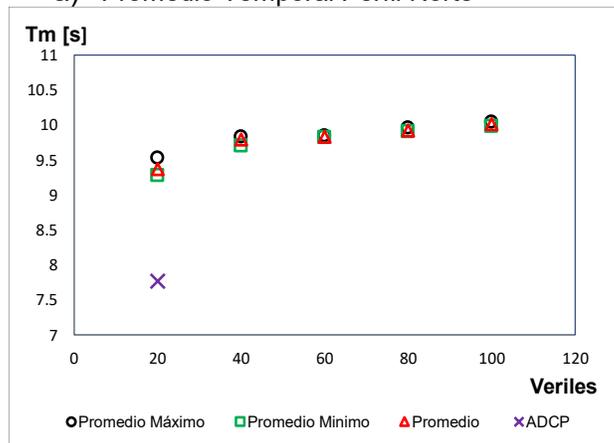
Figura 6-17 Promedio temporal y Dispersión de (Hmo) de la serie, para perfiles Norte y Sur, Lebu.



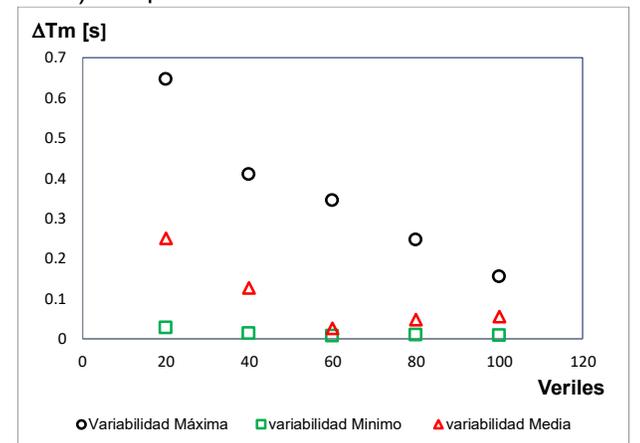
a) Promedio Temporal Perfil Norte



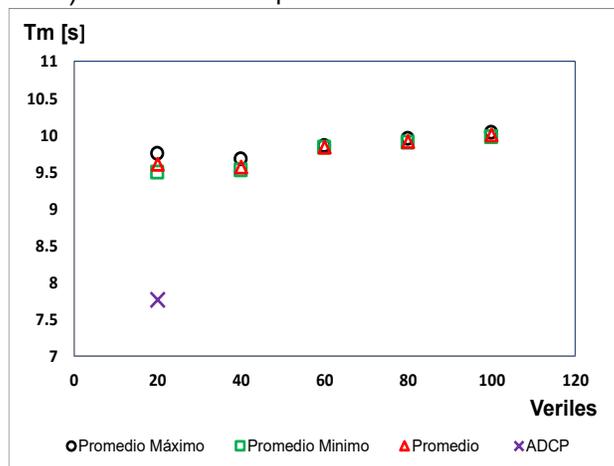
b) Dispersión Perfil Norte



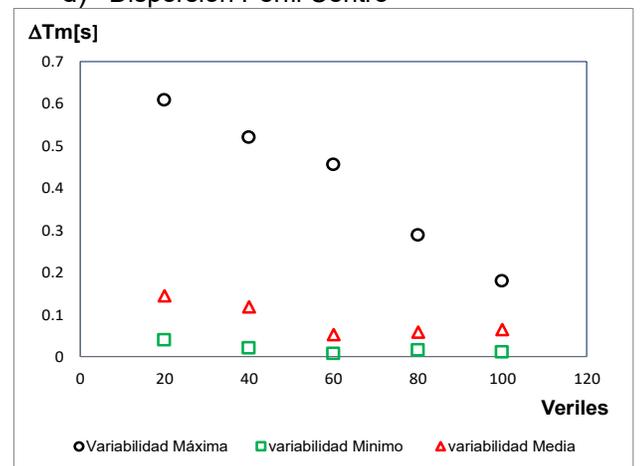
c) Promedio Temporal Perfil Centro



d) Dispersión Perfil Centro



e) Promedio Temporal Perfil Sur



f) Dispersión Perfil Sur

Figura 6-18 Promedio temporal y Dispersión de (T_m) de la serie, para perfiles Norte y Sur, Lebu. Fuente: Elaboración Propia.

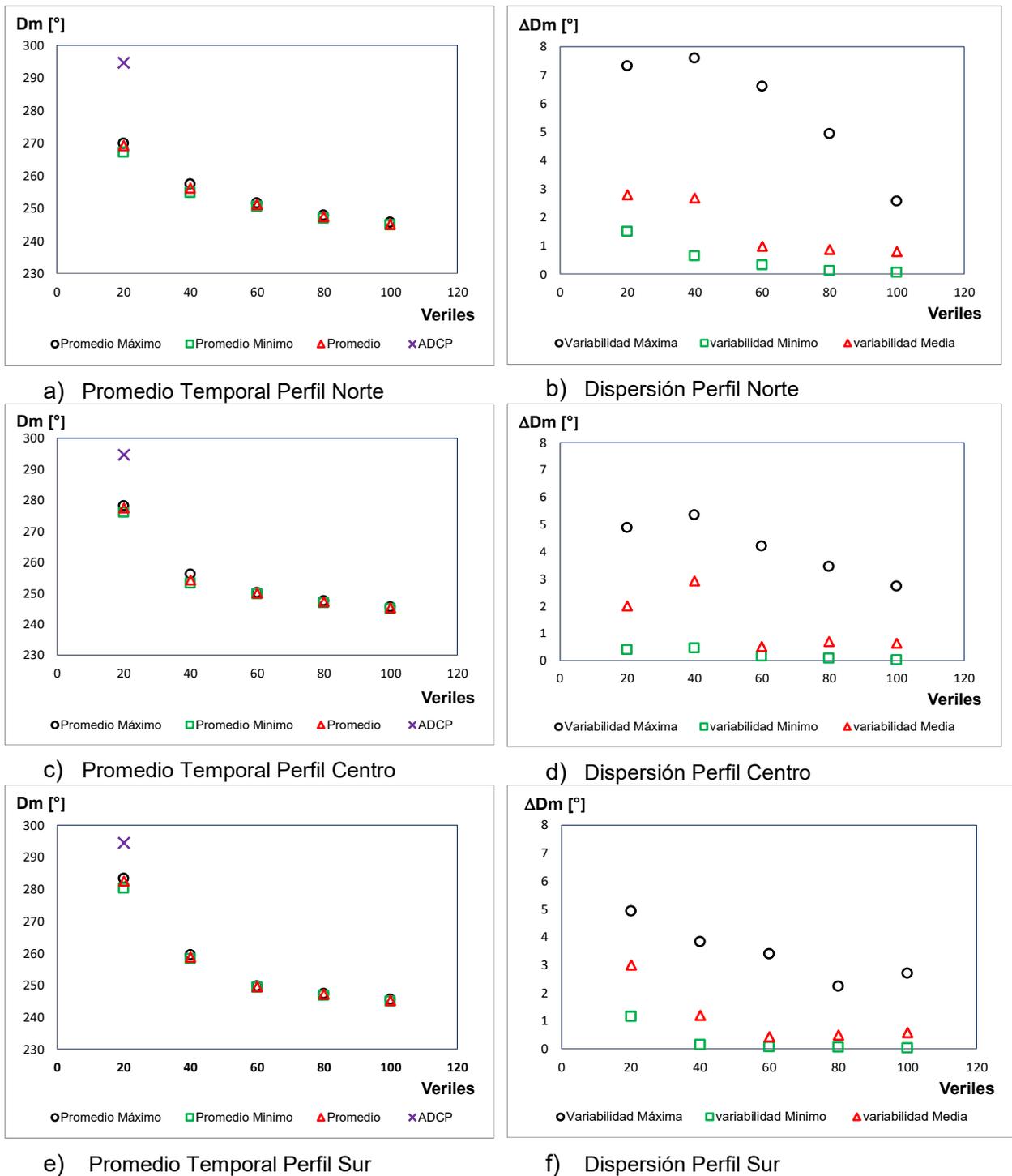


Figura 6-19 Promedio temporal y Dispersión de (Dm) de la serie, para perfiles Norte y Sur, Lebu.

Fuente: Elaboración Propia.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desempeño del modelo de propagación espectral, en función de los escenarios batimétricos considerados, varía en la capacidad predictiva de los estadísticos del oleaje, H_{mo} , T_m y D_m , tomando como referencia las mediciones de campo del ADCP.

Cuando la extensión de la batimetría de detalle se desarrolla hasta los veriles del -100, -80 y -60, se producen mejoras en la capacidad predictiva de los modelos, en cuanto a la determinación de la altura significativa y periodo medio. En estos casos, la diferencia porcentual de los resultados de los modelos, respecto a las mediciones del ADCP, no supera el 1%.

La altura significativa es el estadígrafo que presenta mayor variabilidad, al modificar la batimetría de aproximación. Cuando se evalúan los resultados de las modelaciones versus los datos del ADCP, la diferencia porcentual es -2.7%, para la zona de Curaumilla, en el caso del escenario de detalle hasta el veril -100, mientras que, para el escenario construido con sondajes de cartas náuticas SHOA, se genera una diferencia del 16.4%. En Lebu, se presenta una mayor diferencia porcentual respecto a las mediciones de campo, ~13.3%, para el escenario batimétrico con extensión de detalle hasta el veril -100, mientras que la mayor diferencia se alcanza para el escenario con detalle hasta el veril -40, con un valor del 18.2%.

Al comparar los resultados obtenidos para Curaumilla y Lebu, en general se puede decir que los valores estadísticos del oleaje, presentan similares tendencias, en ambas localidades. En particular, si se comparan los resultados del escenario batimétrico SHOA, se observa que en Lebu existe una mayor correlación entre los resultados del modelo y los datos del ADCP, en comparación a lo que ocurre en Curaumilla. La variación de los resultados en ambas zonas de estudio, puede ser explicada por la densidad de puntos batimétricos de las cartas náuticas del SHOA. En Curaumilla, se aprecia una baja densidad de sondajes existentes, con menos de 10 datos dentro de la bahía, mientras que, en Lebu, los sondajes SHOA cubren la bahía en toda su extensión, con mediciones de transectos, espaciados en promedio a 20 [m], abarcando hasta el veril -60.

La variabilidad de los estadígrafos del oleaje modelados, H_{mo} , T_m y D_m , es creciente a medida que el oleaje se aproxima a la costa, entre los veriles -100 y -20.

En promedio, la dispersión máxima de H_{mo} , T_m y D_m modelada alcanza valores bajos y muy similares entre sí, considerando profundidades mayores al veril -40.

Generalizando, las dispersiones máximas de los estadísticos del oleaje modelados, para los distintos escenarios batimétricos de ambas localidades, no supera los 0.4 [m], 0.9 [s] y 13° , para la altura significativa, periodo medio y dirección media, respectivamente.

Se puede inferir que los cambios batimétricos generados en profundidades mayores a 40 [m], no alteran los valores de la dispersión promedio de las modelaciones, sino que más bien, inducen mayores variabilidades máximas para todos los estadígrafos obtenidos sobre los veriles -40 y -20. Por otra parte, al comparar la dispersión de resultados en un mismo veril, pero en distintos perfiles transversales, no se distinguen mayores cambios en los estadígrafos analizados para cada escenario batimétrico.

Al observar los gráficos de la variabilidad de la dirección media para secciones transversales a la línea de costa, se puede ver que la modelación espectral del oleaje es capaz de reproducir la refracción de los trenes de olas al acercarse a la costa. Esto es más evidente en Lebu, en los veriles de menor profundidad analizados, lo cual se debe a que la bahía se orienta principalmente al NW, generando que el frente de olas tienda a refractarse de manera más notoria.

En función de los resultados obtenidos, se recomienda entonces, previo a la definición de los levantamientos de detalle, chequear la cantidad, densidad y distribución de los sondeos contenidos en las cartas náuticas. Si esta información es robusta, entonces utilizar esta información como complemento, y además simplificar la red de puntos sondeados en terreno, de manera de abaratar costos. Esto teniendo en cuenta que no se constata gran variabilidad de los resultados al aumentar la resolución de detalle entre los veriles -100 y -40.

Se recomienda, como trabajo a futuro, aplicar esta metodología comparativa a otras regiones costeras, que permitan analizar la variabilidad de los resultados de la propagación espectral en función de otras variables como son, las características de oleaje a propagar, el área y la orientación principal de la bahía.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Battjes y Janssen. (1978). *Energy loss and set-up due to Breaking of Random Waves, Proc, 16 Conf. Coastal Eng., ASCE, pp 569-587.*
- Araya, F. (2016). *Caracterización Hidrodinámica y Morfodinámica de Playa Brava, Iquique, Región de Tarapacá, Chile.* Viña del Mar.
- Dean & Dalrymple. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists.*
- DHI. (2012). *Spectral Wave Module. Scientific Documentation.*
- DHI. (2012). *Spectral waves FM module, user guide.*
- Eldeberky and Battjes. (1995, 1996). *Parameterization of Triad Interactions in Wave Energy Models.* Poland: Coastal Dynamics Conference, ASCE.
- G.I.O.C. (2000a). *Documento de Referencia V1 - Dinámicas.* España: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. Universidad de Cantabria.
- GEBCO. (Diciembre de 2017). *www.gebco.net.* Obtenido de http://www.gebco.net/data_and_products/gebco_digital_atlas/
- General Bathymetric Chart of the Oceans.* (s.f.). Obtenido de www.gebco.net
- Giraldo-Henao. (2003). *Introducción a la Geostatística .*
- Goda, Y. (2000). *Random Seas and Desing of Maritime structures, Advanced Series on Ocean Engineering- Volume 15.*
- Guide to wave analysis and forecasting.* (1998).
- Hasselmann, K. (1974). *On the Spectral Dissipation of Ocean Waves due to Whitecapping, Bound. Layer Meteor., 6, 107-127.*
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters.*
- http://fcaglp.unlp.edu.ar/referenciacion/index.php?title=Modelos_Digitales_de_Terreno&redirect=no#Generaci.C3.B3n_a_partir_del_m.C3.A9todo_de_triangular.C3.B3n_con_interpolaci.C3.B3n_lineal. (s.f.).
- Iglesias y Carballo. (2010). *Wave Power for la Isla Bonita.*
- INH. (2014). *Descripción clima aguas profundas, Anexo 2.*
- INH. (2014). *Mediciones de oleaje en aguas profundas.*
- INH. (2014). *Mediciones de oleaje en aguas someras.*
- INH. (2014). *Validación de modelos de propagación.*
- Komar, P. (1998). *Beach Processes and Sedimentation. New Jersey.*
- Komen, G. J. (1994). *Dynamics and Modelling of Ocean Waves.* Cambrigde University Press, UK, 560pp.

- Menéndez, F. J. (2009). *Georreferenciación de cartografía: Datos raster y vectoriales*. National Geophysical Data Center. (s.f.). Obtenido de <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>
- NOAA. (Diciembre de 2017). www.ngdc.noaa.gov. Obtenido de <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>
- Plant et al. (2008). *Nathaniel G. Plant, Kacey L. Edwards, James M. Kaihatu, Jayaram Veeramony, Larry Hsu, K. Todd Holland*.
- RAE. (2016). *Real Academia Española*. Madrid.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada. (s.f.). Obtenido de www.shoa.cl
- SHOA. (Diciembre de 2017). *Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile*.
- SHOA, S. H. (1992). *Glosario de mareas y corrientes*. Valparaíso.
- Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*.
- Young. (1999). *Wind Generated Ocean Waves, In Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2*.