



Memoria de proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico.

Estudio de onda larga en la Bahía de Quintero

Jordy Andrés González Garrido

Junio 2026

ESTUDIO DE ONDA LARGA EN LA BAHÍA DE QUINTERO

Jordy Andrés González Garrido

COMISION EVALUADORA

NOTA

FIRMA

Matías Quezada
Profesor guía

Eduardo Cosio
Integrante de comisión

Sebastián Correa
Integrante de comisión

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.

Jordy González Garrido
Autor

Matías Quezada Labra
Profesor guía

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron, directa e indirectamente, al desarrollo y finalización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi profesor guía, **Matías Quezada**, por su constante apoyo y orientación a lo largo de todo este proceso. Su acompañamiento fue fundamental no solo en el ámbito académico y profesional, sino también en lo personal, constituyéndose en un verdadero guía durante esta etapa formativa.

Agradezco especialmente a **Eduardo Cosío**, integrante de la comisión evaluadora, por su permanente disposición y valioso apoyo en el aprendizaje y comprensión del modelo Boussinesq implementado en MIKE, cuyo aporte resultó clave para el desarrollo de esta investigación. Asimismo, agradezco a **Sebastián Correa**, profesor integrante de la comisión, por su buena disposición, compromiso y dedicación durante el proceso de evaluación.

Agradezco a **Ecotecnos**, institución que contribuyó con información relevante para el desarrollo de este trabajo, así como a mis compañeros de trabajo, quienes fueron parte activa del proceso. En particular, agradezco a **Felipe Galaz, José Ribba, Ariel González, Diego Becerra y Pía Monreal**, por su apoyo, consejos y constante motivación, así como por impulsarme a concretar este proceso de titulación. Extiendo también mi agradecimiento a todos mis demás colegas, quienes, desde distintos espacios, aportaron con un valioso grano de arena.

De igual manera, agradezco a **DHI** por facilitar una licencia estudiantil del software MIKE, herramienta que permitió desarrollar e implementar el modelo Boussinesq utilizado en esta investigación. Su aporte fue fundamental para la ejecución de las simulaciones numéricas y para el adecuado desarrollo metodológico de este trabajo.

Agradezco a la **Universidad de Valparaíso**, institución que fue fundamental en mi formación académica hasta el egreso de la carrera, así como a todos y cada uno de los profesores que fueron parte significativa de este proceso formativo. En particular, agradezco a los profesores **Patricio Winkler, Felipe Caselli, Theo Rojas y Francisco Castro**, junto a todos aquellos docentes que contribuyeron de manera relevante a mi desarrollo académico y profesional.

Asimismo, agradezco a mis compañeros de carrera **Manuel Sepúlveda, Pablo Díaz, Goodeve Guicharrouse, Francisco Pinto y Mariana Saavedra**, así como a todos los demás compañeros con quienes compartí largas jornadas de estudio y numerosas traspasadas, las cuales fueron fundamentales para concluir este proceso formativo.

Finalmente, agradezco profundamente a mi **familia**, en especial a mi **padre, madre y hermano**, quienes, a pesar de la demora del proceso y de las dificultades y frustraciones enfrentadas, me brindaron un apoyo incondicional y permanente. Su presencia constante, más allá de lo estrictamente necesario, fue fundamental para que pudiera alcanzar este importante hito en mi vida.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1	ESTADO DEL ARTE	10
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	OBJETIVO GENERAL.....	12
1.2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
1.3	ALCANCES	12
1.4	LIMITACIONES	12
2	FUNDAMENTO TEÓRICO	13
2.1	OLEAJE	13
2.1.1	DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN	13
2.1.2	TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE	15
2.1.3	ESPECTROS DE OLEAJE.....	21
2.1.4	ESPECTRO CRUZADO	22
2.2	AGITACIÓN AL INTERIOR DE UNA BAHÍA	27
2.2.1	RESONANCIA.....	27
2.2.2	ONDA LARGA.....	28
2.2.3	SEICHES.....	31
2.2.4	ESTIMACIÓN DE MODOS RESONANTES.....	32
2.2.5	MEDICIÓN DE ONDAS LARGAS.....	36
2.3	MODELOS PARA ESTUDIOS DE AGITACIÓN	36
2.3.1	MODELOS FÍSICOS	37
2.3.2	MODELOS NUMÉRICOS.....	37
3	METODOLOGÍA.....	42
3.1	ENFOQUE INSTRUMENTAL	42
3.1.1	ADQUISICIÓN DE DATOS.....	42
3.1.2	PROCESAMIENTO DE LAS SERIES TEMPORALES.....	42
3.1.3	PROCESAMIENTO EN MATLAB	43
3.2	ENFOQUE NUMÉRICO	46
3.2.1	MODELO CONCEPTUAL.....	46
3.2.2	MODELO NUMÉRICO.....	47
3.2.3	VALIDACIÓN Y COMPARACIÓN.....	47

4	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS	49
4.1	MEDICIONES DE CAMPO DISPONIBLES	49
4.1.1	OLEAJE	50
4.1.2	BATIMETRÍA.....	51
4.2	DATOS PROCESADOS	51
4.2.1	ANTECEDENTES VISUALES	52
4.2.2	ESPECTRO CRUZADO PARA CADA ADCP	53
4.2.3	ESPECTRO CRUZADO POR ARREGLO DE TRANSDUCTORES.....	56
4.2.4	ESPECTRO CRUZADO CON VALORES MAREALES.....	59
4.2.5	SÍNTESIS DE RESULTADOS PROCESADOS	62
5	MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA.....	63
5.1	MIKE 21 BOUSSINEQ WAVE	63
5.2	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	64
5.2.1	DOMINIO.....	64
5.2.2	CAPAS DE ESPONJA.....	65
5.2.3	CAPAS DE POROSIDAD	65
5.2.4	PALETA DE GENERACIÓN	66
5.2.5	PARAMETROS FÍSICOS	69
5.3	MODELO NUMÉRICO DE RESONANCIA	69
5.3.1	ESTIMACIÓN PRELIMINAR DE LOS MODOS RESONANTE	69
5.3.2	ESPECTRO DE RUIDO BLANCO	70
5.4	RESULTADOS DEL MODELO NUMERICO DE RESONANCIA.....	71
7.4.3	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	72
5.5	COMPARACION DE DATOS DE CAMPO Y MODELACIÓN	75
6	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	77
7	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	79
8	ANEXOS.....	81
8.1	ANEXO A: SERIES DE TIEMPO DE CADA ADCP.....	105
8.2	ANEXO B: ESPECTRO CRUZADO PARA CADA ADCP	108
8.3	ANEXO C: ESPECTRO CRUZADO PARA CADA TRANSDUCTOR COMBINADO	332

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de acuerdo con el tipo de onda.	14
Tabla 2. Caracterización del oleaje según su profundidad relativa.....	15
Tabla 3. Valores del coeficiente de reflexión.....	19
Tabla 4. Formas para llevar a cabo mediciones de espectros bimodales de oleaje	23
Tabla 5. Modos resonantes para una cuenca abierta y cerrada de profundidad constante	33
Tabla 6. Coordenadas y profundidad de los puntos de ubicación de cada ADCP	49
Tabla 7: Frecuencias identificadas en cada ADCP y su conversión a periodos.....	54
Tabla 8. Conteo de la cantidad de veces que se repite la frecuencia peak específica en cada arreglo de transductores. Mientras más intenso el color rojo, más veces se repite.	57
Tabla 9. Frecuencias de los peaks identificados en espectro cruzado de mareas.	59
Tabla 10: Síntesis de frecuencias detectadas y su clasificación	62
Tabla 11. Periodos naturales de oscilación obtenidos con ecuaciones paramétricas.....	70
Tabla 12. Coordenadas locales de los nodos para la extracción de información de la simulación numérica.	72
Tabla 13. Valores de los modos resonantes de la Bahía de Quintero.	74
Tabla 14. Frecuencias y periodos de la simulación numérica y los datos de campo, junto con sus porcentajes de error absoluto.	75
Tabla 15. Periodos del modelo versus periodos de campo, categorizados en función de su error.....	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de una onda de oleaje regular.....	13
Figura 2. Periodo – energía de las ondas.	14
Figura 3. Diagrama de refracción de ondas regulares.....	16
Figura 4. Oleaje incidente con difracción a causa de un muro.	17
Figura 5. Diagrama de difracción de una ola con 165° de ángulo.	17
Figura 6 Asomeramiento del oleaje hasta llegar a la rotura.....	20
Figura 7. Ejemplo de configuraciones óptimas para localizar medidores de oleaje.	24
Figura 8. Perfil de superficie de los cuatro primeros modos resonantes para una cuenca abierta y cerrada con profundidad constante.	33
Figura 9. Mapa conceptual del procedimiento metodológico.....	48
Figura 10: Periodo peak, dirección peak y altura significativa del ADCP A01.	50

Figura 11. Ondulaciones regulares a lo largo de la Bahía de Quintero en fechas diferentes, cerca del terminal portuario Ventanas. Arriba en marzo de 2010 y abajo en junio de 2018.	52
Figura 12. Espectro cruzado aplicado para cada ADCP por sí solo.	55
Figura 13. Posición de los transductores de cada ADCP para los arreglos de espectro cruzado.....	56
Figura 14. Resultado de la obtención del espectro cruzado mediante la combinación de cada uno de los transductores.	58
Figura 15. Resultado de la obtención del espectro cruzado de los datos mareales de cada ADCP.	61
Figura 16. Dominio numérico realizado a partir de la batimetría disponible con una rotación de 45° grados.	64
Figura 17. Capas de esponja para la simulación numérica.	65
Figura 18. Capa de porosidad en morado utilizado para la simulación de la modelación numérica.....	66
Figura 19. Altura de ola de simulación numérica para representar estabilidad numérica en un periodo de simulación de 180 minutos.	67
Figura 20. Salida del modelo luego de las tres horas de simulación. Se grafica elevación de la superficie donde la imagen superior es el inicio de la simulación y la inferior es el término.	68
Figura 21. Dimensiones en planta de la bahía de Quintero.....	70
Figura 22. Ubicación de los nodos de extracción de datos equivalentes a los ADCP.....	71
Figura 23. Espectros de energía obtenidos de la simulación de ruido blanco para cada nodo	73
Figura 24. Frecuencias naturales asociados al peak más energético de cada sensor posicionado en la Bahía de Quintero.	74

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación de cada ADCP en la Bahía de Quintero.	49
Ilustración 2. Datos batimétricos utilizados para realizar la modelación numérica.....	51

RESUMEN

Este estudio se enfoca en la resonancia de ondas de baja frecuencia en la Bahía de Quintero, una región con alta actividad industrial en la costa central de Chile. La bahía alberga diversas industrias, incluidas refinerías y plantas termoeléctricas, que han contribuido significativamente a la contaminación ambiental y al riesgo para la salud de las comunidades locales, convirtiéndola en una "zona de sacrificio".

El estudio tiene como objetivo principal identificar las ondas largas presentes en la Bahía de Quintero donde se aplica, tanto el procesamiento de información de campo, como un modelo numérico basado en las ecuaciones de Boussinesq para simular estos fenómenos y determinar los modos resonantes naturales de la bahía.

Para alcanzar estos objetivos, se combinaron mediciones de campo de cuatro ADCPs y modelación numérica mediante el software MIKE BW. Este enfoque permitió recopilar datos detallados sobre el oleaje y sus frecuencias en diferentes puntos de la bahía y simular las condiciones de resonancia.

Los resultados evidencian la presencia de ondas largas no mareales en la Bahía de Quintero, incluyendo ondas de infragravedad (30–55 s) y ondas de largo período (256–512 s), identificadas de manera consistente a partir del análisis espectral de los registros ADCP. Asimismo, la modelación numérica basada en las ecuaciones de Boussinesq, implementada mediante MIKE BW, permitió identificar modos resonantes naturales de la bahía, cuyos períodos presentan una buena concordancia con los obtenidos a partir de los datos de campo.