



UNIVERSIDAD DE VALPARAISO  
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES  
INGENIERIA CIVIL OCEANICA

“CARACTERIZACION DE OLEAJE E HIDRODINAMICA PARA LA OPERATIVIDAD  
EN PLAYA CALETA ABARCA, V REGION CHILE”

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico

**JUAN CARLOS MERCADO CUELLAR**

Profesor Guía: Arnaldo Torres Contador

Profesor Co-Guía: Mario Cáceres Muñoz

Marzo 2010



# Presentación

El presente estudio de pre-grado es el fruto del trabajo de investigación para optar al título de Ingeniero Civil Oceánico en el área hidráulica marítima; cuyo investigador principal y responsable es Juan Carlos Mercado Cuellar.

Juan Carlos Mercado Cuellar  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería

Arnaldo Torres Contador  
Meteorólogo, Mag. en Ingeniería y Tecnología Ambiental

Mario Cáceres Muñoz  
Doctor of Philosophy y Mag. Ccias. mc. Oceanografía.

*La presente investigación se escribió en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X...*



## Aprobación

“CARACTERIZACION DE OLAJE E HIDRODINAMICA PARA LA OPERATIVIDAD EN PLAYA CALETA ABARCA, V REGION CHILE”

JUAN CARLOS MERCADO CUELLAR

### COMISION REVISORA

### CALIFICACIONES

*Nota*

*Firma*

Arnaldo Torres Contador  
Gerente  
MetOcean Solutions Chile Ltda.  
Profesor Guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Mario Cáceres Muñoz  
Profesor Adjunto, Universidad de Valparaíso  
Profesor Co-Guía

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Matías Quezada Labra  
Profesor Universidad de Valparaíso  
Baird & Associates S.A  
Miembro de Comité Memoria

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Viña del Mar, Marzo 2010.



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

Juan Carlos Mercado Cuellar  
Licenciado en Ciencias de la Ingeniería



## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios, creador de la madre naturaleza que nos acoge día a día en su belleza existencial. Entregando un cuerpo de agua llamado mar, que me inspira en cada instante de tiempo, a seguir amando el entorno natural

Mi amada familia en especial a mis padres Rosa Marisol y Juan Carlos, que supieron guiarme en una entorno confuso de opciones y decisiones que algunos le llaman vida. Gracias por darme Educación y Valores, herramientas fundamentales para comprender el entorno y de lo que realmente persigo. Gobernar es Educar...

Al conjunto de notas musicales que se pasean con ritmos atrayentes, que hipnotizan mi cuerpo que hace nada más que bailar y disfrutar sin pensar, conocida como Funk o música de sentir el entorno para seguir avanzando en la realidad.

A mi querida novia humanista Evelyn Andrea, que fue importante en el renacer de poder amar y ver la vida color rosa, en un palpitar de dos corazones en que me enseñó que  $1+1$  es igual 1. Destacando que te debo muchos besos, por cumplir un papel fundamental en la estructura de la presente investigación.

Si bien a esta persona no le puedo deber besos, estaré agradecido toda la vida por cumplir un rol fundamental en la realización del estudio, hablo del Maestro Mario Cáceres Muñoz, que semana a semana me guío para cumplir la metas propuestas.

Agradecer al dúo dinámico Arnaldo Torres y en especial a mi compadre Christopher Sáez, por todo el tiempo invertido en la realización del estudio y a lo compartido en lo personal.

Por el tiempo invertido en lo académico, como por lo ayudado en problemas personales, al Profesor y amigo Matías Quezada. De gran exigencia, y como no olvidarlo si fue el único que me mando a examen durante los años de carrera, haciéndome acordar lo que realmente puedo entregar.

Si bien, he agradecido hasta el momento a los que en gran medida contribuyeron directamente al trabajo presente. Existe un grupo de personas en la Universidad de Valparaíso que fueron importantes en mi crecimiento personal y visión de vida, los que no he querido dejar de nombrar. A los Académicos: Pedro Delgado, Hernán Vergara, René Astudillo, Rubén Castro, Felipe Casselli, Manuel Contreras, Marcelo Baeza e Ignacio Poblete. Sin olvidar a las bibliotecólogas y secretarías; Pamela, Jeanette, Jacqueline y Marjorie.

A todo la comunidad oceánica por las vibras positivas que daban color a las salas de clases y pasillos. En especial a mis compañeros Ivan Rojas, Patricio Opazo, Cristian Santander, Francisco Molteni,



María José Gangas, Richard Pereira, Juan Pablo Jorquera, Alejandro Vera, Eduardo Monsalve y Mauricio Molina (M&M). Y al amigo que se perdió en las telarañas del amor Rodrigo Peña.

Finalmente dar las gracias a Patricio Winckler, por las mejoras que provocó en el perfil del alumno de la carrera Ingeniería Oceánica, entregando gran parte de su tiempo a tal contribución.

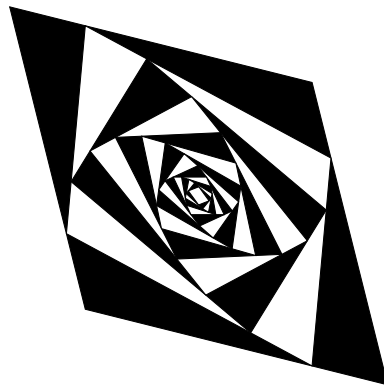
Juan Carlos Mercado Cuellar.  
Marzo 2010

*Valparaíso que me diste la virtud de admirar el mar y su belleza, que en noches bohemias me enseñaste lo que era la vida, tristeza, felicidad, pobreza y riqueza, y por qué no filosofía de vida en tierra de versos enloquecida entre cerros acoplados junto al mar, creador de versos en un vaivén de ir y venir...*



*“La teoría dice mucho,  
Pero en realidad no nos acerca  
en absoluto a los secretos del Viejo.  
Sea como fuese, yo estoy convencido  
de que Dios no juega a los dados”*

*Albert Einstein.*



*“Tu complejidad no lineal,  
es lo que me hace desear,  
desear tu conocimiento intenso radial,  
un día vuelves y vas pero sigues estando acá,  
tu infinitud distante me hace pensar,  
que la vida es bella por la magnitud que me muestras al pasar,  
tal vez algún día te logre entender de verdad,  
sino me quedara la nostalgia de vivir toda una vida admirándote al pasar.”*

JCMC.



## Resumen

La presente investigación tuvo por finalidad identificar áreas seguras y peligrosas para el nado de los bañistas, en función de los parámetros de ola y corriente estudiados.

El estudio se realizó mediante la propagación de olas y corrientes, con diversos modelos que logran obtener resultados de distribución de estas propiedades en la zona de estudio. Se realizó una primera validación de los resultados, comparándolos con los datos *in situ* de corriente medidos en el lugar de estudio.

Los datos *in situ* se obtuvieron mediante un correntómetro y un ADCP remolcado, los cuales se utilizaron para validar las magnitudes y direcciones. La implementación numérica que se desarrolló, aproximó de manera aceptable el campo de magnitudes de corrientes observado.

Se concluye que en gran parte del año, la playa Caleta Abarca en todas sus áreas es operable o apta para el baño, en función de los parámetros en estudio, especialmente en la temporada de Verano. Los resultados obtenidos son una primera aproximación respecto a la operatividad de Caleta Abarca, dado que en la investigación se utilizó solo un año de datos de oleaje.





## Abstract

*The aim of this study is to identify both safe and hazardous areas for swimmers in relation to the distribution of wave and current fields.*

*The study was developed by means of wave and current propagation models that show field distributions of these properties. A first validation of the results was obtained by comparing model hydrodynamic results with measured in situ current data.*

*In situ data was obtained by means of a currentmeter and a towed ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) which were used for validating current magnitudes and directions in the study area. Numeric implementation retrieved fair current approximations.*

*The conclusion is that most of the year Caleta Abarca beach is safe or suitable for swimming in all its areas, based on the studied properties, especially during the summer season.*



# Contenido

<b>Presentación</b>	<b>i</b>
<b>Aprobación</b>	<b>ii</b>
<b>Declaración</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1-1</b>
<b>2 Objetivos</b>	<b>2-1</b>
2.1 General . . . . .	2-1
2.2 Específicos . . . . .	2-1
<b>3 Marco teórico</b>	<b>3-1</b>
3.1 Oleaje . . . . .	3-1
3.1.1 Generalidades . . . . .	3-1
3.1.2 Teoría de olas . . . . .	3-3
3.2 Caracterización estadística del oleaje . . . . .	3-3
3.2.1 Corto plazo . . . . .	3-3
3.2.2 Mediano Plazo . . . . .	3-4
3.2.3 Largo plazo . . . . .	3-4
3.3 Oleaje espectral . . . . .	3-5
3.3.1 Definición . . . . .	3-5
3.3.2 Modelos espectrales . . . . .	3-5
3.3.3 Dispersión direccional . . . . .	3-7
3.3.4 Parámetros espectrales . . . . .	3-7
3.4 Propagación de oleaje . . . . .	3-9
3.4.1 Fenómenos asociados . . . . .	3-9
3.4.1.1 <i>Shoaling</i> (asomeramiento) . . . . .	3-9
3.4.1.2 Refracción . . . . .	3-9
3.4.1.3 Reflexión . . . . .	3-9
3.4.1.4 Difracción . . . . .	3-10
3.4.1.5 Rotura . . . . .	3-10
3.4.2 Métodos de propagación . . . . .	3-11
3.4.2.1 Parámetros de resumen . . . . .	3-11
3.4.2.2 Cuasi purista . . . . .	3-11



3.4.2.3	Cuasi purista modificado	3-12
3.4.2.4	Purista	3-12
3.4.3	Transferencia espectral	3-12
3.5	Modelos de propagación de oleaje	3-12
3.5.1	Generalidades	3-12
3.5.2	Modelo Parabólico	3-13
3.5.3	Modelo Elíptico	3-14
3.6	Hidrodinámica de playas	3-15
3.6.1	Corriente longitudinal	3-16
3.6.2	Corriente de retorno ( <i>rip current</i> ).	3-17
3.6.3	Corriente de resaca	3-18
3.7	Modelos de circulación costera	3-18
3.7.1	Generalidades	3-18
3.7.2	Modelado de las Corriente Costeras	3-19
3.8	Aspectos Biomecánicos en el nado	3-20
3.8.1	Flotación	3-21
3.8.2	Resistencia	3-21
3.8.3	Propulsión	3-22
<b>4</b>	<b>Metodología</b>	<b>4-1</b>
4.1	Materiales	4-1
4.1.1	Cartas náuticas	4-1
4.1.2	Base de datos de oleaje	4-2
4.1.3	Software	4-2
4.1.4	Sistema de procesamiento	4-3
4.1.5	Correntómetro	4-3
4.1.6	ADCP ( <i>Acoustic Doppler Current Profiler</i> )	4-3
4.1.7	CTD	4-4
4.2	Diseño metodológico	4-5
4.2.1	Caracterización de aguas profundas	4-5
4.2.2	Implementación numérica de aproximación ( <i>Stwave</i> )	4-5
4.2.3	Caracterización de la zona de transición	4-7
4.2.4	Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO)	4-8
4.2.5	Caracterización de la zona de estudio	4-8
4.2.6	Caracterización de datos <i>In situ</i>	4-9
4.2.7	Validación	4-11
4.2.8	Desarrollo del criterio operativo del baño	4-11
4.2.9	Análisis operativo del baño	4-12
<b>5</b>	<b>Resultados obtenidos</b>	<b>5-1</b>
5.1	Caracterización de aguas profundas	5-1
5.2	Implementación numérica de aproximación ( <i>Stwave</i> )	5-2
5.3	Caracterización de la zona de transición	5-6
5.4	Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO)	5-7
5.5	Caracterización de la zona de estudio	5-11
5.6	Caracterización de datos <i>In situ</i>	5-22
5.7	Validación	5-29
5.8	Desarrollo del criterio operativo del baño	5-34
5.9	Análisis operativo del baño	5-35
<b>6</b>	<b>Discusión</b>	<b>6-1</b>
6.1	Aproximación de oleaje al punto de transición	6-1



---

6.2	Propagación de oleaje a playa Caleta Abarca . . . . .	6-1
6.3	Datos <i>In situ</i> . . . . .	6-2
6.4	Operatividad playa Caleta Abarca . . . . .	6-2
<b>7</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>7-1</b>
7.1	Aproximación de oleaje al punto de transición . . . . .	7-1
7.2	Propagación de oleaje a playa Caleta Abarca . . . . .	7-1
7.3	Datos <i>In situ</i> . . . . .	7-1
7.4	Operatividad playa Caleta Abarca . . . . .	7-2
7.5	Alcance . . . . .	7-2
<b>8</b>	<b>Glosario</b>	<b>8-1</b>
<b>9</b>	<b>Referencias</b>	<b>9-1</b>
<b>10</b>	<b>Anexo</b>	<b>10-1</b>
10.1	Criterio de anidamiento (punto de transición) . . . . .	10-1
10.2	Caracterización de aguas profundas . . . . .	10-3
10.3	Caracterización de la zona de transición . . . . .	10-4
10.4	Implementación numérica zona de estudio (WAPO-COCO) . . . . .	10-5
10.5	Caracterización de la zona de estudio . . . . .	10-7
10.6	Validación . . . . .	10-12



## Lista de Tablas

4.1	Configuración mallas del modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	4-7
4.2	Puntos del circuito del ADCP remolcado. Fuente: E.P. . . . .	4-9
4.3	Inicio y termino de los circuitos del ADCP remolcado. Fuente: E.P. . . . .	4-10
5.1	Propagación de oleaje en modelo WAPO, 58 casos. Fuente: E.P. . . . .	5-9
5.2	Resultados de los modelos en la zona área 1, 58 casos. Fuente: E.P. . . . .	5-12
5.3	Resultados de los modelos en la zona área 2, 58 casos. Fuente: E.P. . . . .	5-13
5.4	Porcentaje de corriente explicado por Marea. Fuente: E.P. . . . .	5-27
5.5	Desarrollo del criterio operable para playas. Fuente: E.P. . . . .	5-34
5.6	Porcentajes de alturas de olas en las áreas. Fuente: E.P. . . . .	5-36
10.1	Justificación del criterio de anidamiento en base al error promedio. Fuente: E.P. . . . .	10-1
10.2	Incidencia Periodo pico- Dirección pico, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	10-3
10.3	Incidencia Periodo pico- Altura sig, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	10-3
10.4	Incidencia Altura sig- Dirección pico, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	10-3
10.5	Incidencia Periodo pico- Dirección pico, punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	10-4
10.6	Incidencia Periodo pico- Altura sig, punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	10-4
10.7	Incidencia Altura sig- Dirección pico, punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	10-4
10.8	Incidencia Corriente longitudinal- Corriente transversal, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.9	Incidencia Altura sig- Corriente longitudinal, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.10	Incidencia Altura sig- Corriente transversal, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.11	Incidencia Corriente longitudinal- Corriente transversal, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11
10.12	Incidencia Altura sig- Corriente longitudinal, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11
10.13	Incidencia Altura sig- Corriente transversal, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11
10.14	Incidencia U-V de datos <i>in situ</i> , 21-22 Diciembre. Fuente: E.P. . . . .	10-12
10.15	Incidencia U-V, Diciembre datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	10-12



## Lista de Figuras

1.1	Playa Caleta Abarca, Bahía Valparaíso. Fuente: Elaboración Propia (E.P.) . . . . .	1-2
3.1	Caracterización de una onda. Fuente: <i>Guzmán [2006]</i> . . . . .	3-2
3.2	Teorías de olas. Fuente: <i>Coastal Engineering Manual [2002c]</i> . . . . .	3-3
3.3	Espectros en 2 dimensiones. Fuente: <i>Silva [2005]</i> . . . . .	3-5
3.4	Variación de $H_s/H_{m_0}$ en función de $\bar{d}$ . Fuente: <i>Coastal Engineering Manual [2002c]</i> . .	3-8
3.5	Tipos de rotura del oleaje. Fuente: [ <i>Coastal Engineering Manual [2003]</i> ] . . . . .	3-11
3.6	Tipos de corrientes cercanas a la playa. Fuente: <i>Quezada [2008]</i> . . . . .	3-16
3.7	Interacción de fuerzas en el nado. Fuente: <i>Llana [2002]</i> . . . . .	3-21
3.8	Presión de propulsión en el nado. Fuente: <i>Llana [2002]</i> . . . . .	3-22
4.1	Carta náutica N° 5111, Bahía y Puerto de Valparaíso. Fuente: SHOA . . . . .	4-1
4.2	Ubicación nodo de estadísticas en aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	4-2
4.3	Correntómetro tipo sensor data. Fuente: E.P. . . . .	4-3
4.4	ADCP tipo sentinel. Fuente: RDInstruments . . . . .	4-4
4.5	CTD tipo SBE-19. Fuente: Sea-Bird Electronics . . . . .	4-4
4.6	Esquema diseño metodológico. Fuente: E.P. . . . .	4-5
4.7	Demarcado de las áreas de implementación de los modelos. Fuente: E.P. . . . .	4-6
4.8	Configuración de mallas del modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	4-7
4.9	Áreas en estudio de playa Caleta Abarca. Fuente: E.P. . . . .	4-9
4.10	Ruta de ADCP remolcado en playa Caleta Abarca. Fuente: E.P. . . . .	4-10
5.1	Curva de excedencia $H_s$ , aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	5-1
5.2	Rosas de oleaje, aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	5-2
5.3	Distribución conjunta $H_s$ - $T_p$ , aguas profundas. Fuente: E.P. . . . .	5-2
5.4	Batimetría para el modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	5-3
5.5	Ejemplo de dirección y altura de ola del modelo <i>Stwave</i> . Fuente: E.P. . . . .	5-4
5.6	Funciones de transferencia al punto de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-5
5.7	Curvas de $T_p$ y $H_s$ , zona de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-6
5.8	Rosas de oleaje, zona de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-7
5.9	Distribución conjunta $H_s$ - $T_p$ , zona de transición. Fuente: E.P. . . . .	5-7
5.10	Batimetría para el modelo WAPO y COCO. Fuente: E.P. . . . .	5-8
5.11	Modelado en la zona de estudio caso NW. Fuente: E.P. . . . .	5-10
5.12	Gráficas de ocurrencia, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-15
5.13	Gráficas de contorno, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-16
5.14	Serie de tiempo, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-17
5.15	Gráficas de ocurrencia, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-19
5.16	Gráficas de contorno, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-20
5.17	Serie de tiempo, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-21
5.18	Resultados CTD en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-22



5.19	Perfil de corriente del ADCP remolcado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-23
5.20	Resultados ADCP remolcado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-24
5.21	Resultado 1 del correntómetro ubicado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-26
5.22	Resultado 2 del correntómetro ubicado en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-26
5.23	Diagrama de vector progresivo del correntómetro. Fuente: E.P. . . . .	5-27
5.24	Serie de marea, componente $U$ , $V$ y diagrama de trazos filtrados. Fuente: E.P. . . . .	5-28
5.25	Variación de los parámetros naturales. Fuente: E.P. . . . .	5-28
5.26	Validación por curvas de ocurrencia, componente $U$ . Fuente: E.P. . . . .	5-30
5.27	Validación por curvas de ocurrencia, componente $V$ . Fuente: E.P. . . . .	5-30
5.28	Validación 1 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	5-31
5.29	Validación 2 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	5-32
5.30	Validación 3 por ADCP remolcado y datos modelados. Fuente: E.P. . . . .	5-33
5.31	Tendencia de corrientes longitudinales y transversales en la playa. Fuente: E.P. . . . .	5-35
5.32	Análisis operacional, área 1. Fuente: E.P. . . . .	5-36
5.33	Análisis operacional, área 2. Fuente: E.P. . . . .	5-37
10.1	Esquema general de puntos en el veril de anidamiento. Fuente: E.P. . . . .	10-1
10.2	Funciones de transferencia respecto a la del punto de anidamiento. Fuente: E.P. . . . .	10-2
10.3	Modelado en la zona de estudio caso NNW. Fuente: E.P. . . . .	10-5
10.4	Modelado en la zona de estudio caso WNW. Fuente: E.P. . . . .	10-6
10.5	Alturas de olas modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P. . . . .	10-7
10.6	Corrientes longitudinales modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P. . . . .	10-8
10.7	Corrientes transversales modeladas en las áreas de estudio. Fuente: E.P. . . . .	10-9
10.8	Gráfica de excedencia altura de ola, área 1. Fuente: E.P. . . . .	10-10
10.9	Gráfica de excedencia altura de ola, área 2. Fuente: E.P. . . . .	10-11