



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

**COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DE OLEAJE  
BOUSSINESQ Y NO LINEAL DE AGUAS SOMERAS EN EL  
PUERTO DE SAN ANTONIO.**

José Manuel Gómez Rubilar

2020

COMPARACIÓN ENTRE MODELOS DE OLEAJE BOUSSINESQ Y NO LINEAL  
DE AGUAS SOMERAS EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO.

JOSÉ MANUEL GÓMEZ RUBILAR

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Patricio Winckler

Profesor guía

---

---

Felipe Maldonado

Revisor

---

---

Cesar Esparza

Revisor

---

---

## **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.

## DEDICATORIA

*Para mi madre.*

## AGRADECIMIENTOS

A EPSA (Empresa Portuaria San Antonio), por los datos entregados con los cuales fue posible desarrollar esta memoria.

Powered@NLHPC: Esta investigación/tesis fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02), donde finalmente se corrió el modelo SWASH para una mayor velocidad de cálculo.

Al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Valparaíso, por los datos entregados para facilitar las modelaciones.

Al Laboratorio de Ingeniería y Desarrollo de la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas. Por ayudarme y brindarme muchas de las herramientas que utilicé para el desarrollo de esta tesis.

A mi profesor guía Patricio Winckler Grez, quien me guio, apoyó y ayudó a sacar esta tesis adelante, pese a todos los problemas e inconvenientes que tuvimos. Por su paciencia al explicarme cada proceso y fenómeno asociado con las ecuaciones de gobierno de los modelos; por mostrarme distintas soluciones a los problemas y por corregirme esta memoria en repetidas ocasiones.

A Felipe Maldonado, por su guía y ayuda en todo lo referente a los modelos utilizados y la programación necesaria para la automatización de los procesos, y como revisor de mi memoria.

A Cesar Esparza, por orientarme y guiarme en cómo desarrollar, obtener y presentar la información. Por su guía en las calibraciones, en el análisis de los datos obtenidos de los modelos y por la revisión de la memoria.

A mi madre, por su paciencia, esfuerzo y apoyo durante todos los años de mi vida; por educarme y enseñarme de la mejor manera posible para convertirme en un buen profesional; por inculcarme la responsabilidad y la perseverancia para salir adelante.

A mi hermano, quién desde pequeño me inculcó que lo más importante eran las matemáticas; por exigir siempre lo mejor de mí, y pese a la distancia estar presente en mi vida de estudiante.

A mis amigos, Daniel, Sebastián y Sergio, con los cuales comencé esta aventura, y quienes a pesar del tiempo y de tomar caminos distintos en el ámbito profesional, siempre han procurado acompañarme a lo largo de la carrera. A Carla, mi amiga desde hace muchos años, quien estuvo conmigo y me acompañó en todo el proceso de esta tesis, me alentó y apoyó en este desafío de muchas formas cuando lo necesité, y me ayudó a hacer las cosas de la manera más simple posible.

Y a cada persona que me dio alguna palabra de aliento, a cada persona que estuvo involucrada en esto directa o indirectamente. A nuestro negocio familiar la Botillería, que me dio la oportunidad de poder estudiar y tener una profesión.

## TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	11
1. INTRODUCCIÓN .....	12
2. OBJETIVOS .....	13
3. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	14
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1 FÍSICA DEL OLEAJE .....	15
4.2 TEORÍAS DE OLEAJE .....	18
4.2.1 TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE .....	19
4.2.2 TEORIAS NO LINEALES DEL OLEAJE .....	19
4.3 MODELOS UTILIZADOS ACTUALMENTE .....	20
4.3.1 SWASH, MODELO DE PROPAGACIÓN NO LINEAL .....	21
4.3.2 CELERIS, MODELO DE PROPAGACIÓN BOUSSINESQ .....	25
4.3.3 HARDWARE EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA.....	30
5 METODOLOGÍA.....	32
5.1 MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002) .....	33
5.2 MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL, COEFICIENTES DE AGITACIÓN (ASOMERAMIENTO) .....	35
5.3 MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO.....	36
5.3.1 BATIMETRÍA REAL Y DOMINIO DE CÁLCULO .....	36
5.3.2 ANÁLISIS DE CLIMA MEDIO .....	38
5.3.3 CALIBRACIÓN DE LOS DATOS DE CONDICIÓN DE BORDE.....	39
5.3.4 SELECCIÓN DE CLIMAS DE OLEAJE .....	44
5.3.5 OBTENCIÓN DE LOS DATOS.....	46
6 RESULTADOS .....	47
6.1 MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002) .....	47
6.1.1 REPRODUCCIÓN DEL EXPERIMENTO DE LYNETT ET AL. (2002) .....	47
6.1.2 EXTENSIÓN DEL EXPERIMENTO DE LYNETT ET AL. (2002) A OTRAS PENDIENTES (0.13 y 0.26).....	52
6.1.3 OLEAJE IRREGULAR EN EL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002).....	58
6.2 MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL, COEFICIENTES DE AGITACIÓN (ASOMERAMIENTO) .....	59
6.3 MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO.....	65
6.3.1 DESNIVELACIONES Y ESPECTROS.....	66

6.3.2	PARÁMETROS DE RESUMEN Y CORRELACIONES.....	68
7	DISCUSIONES.....	81
7.1	MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002) .....	81
7.2	MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL.....	82
7.3	MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO.....	83
7.3.1	DIRECCIONES .....	84
7.3.2	PERÍODOS .....	84
7.3.3	ALTURAS.....	85
7.3.4	OTROS TEMAS .....	86
8	CONCLUSIONES.....	87
	REFERENCIAS .....	88
	ANEXOS.....	90
A.	DERIVACIÓN SIMPLIFICADA DE LAS ECUACIONES NO LINEALES DE AGUAS SOMERAS .....	90
B.	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA SWASH .....	91
C.	IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA CELERIS .....	95
D.	CLIMA MEDIO DE OLEAJE .....	97
1.D.1	DATOS PROPAGADOS.....	97
1.D.2	DATOS ADCP .....	101
1.D.3	DATOS SITIO 9.....	105
E.	DATOS OBTENIDOS PARA LOS OTROS PUNTOS DE INTERÉS .....	108
1.E.1	CELERIS.....	108
1.E.2	SWASH.....	114

## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Zonas de propagación del oleaje .....	16
Ilustración 2: Proceso de asomeramiento .....	16
Ilustración 3: Proceso de refracción .....	17
Ilustración 4: Fenómeno de difracción .....	17
Ilustración 5 : Esquema de run-up y run-down .....	18
Ilustración 6: Teorías de ondas.....	19
Ilustración 7: Batimetría ideal utilizada, pendiente 0.04.....	33
Ilustración 8: Vista en elevación batimetría ideal, pendiente 0.04 .....	34
Ilustración 9: Batimetría ideal con pendiente del 20%.....	35
Ilustración 10: Dominio de cálculo.....	37
Ilustración 11: Batimetría final utilizada .....	37
Ilustración 12: Ubicación ADCP .....	38
Ilustración 13: Ubicación sitio 9.....	39
Ilustración 14: Rosa de dispersión Tp/Dir datos UV Junio-Julio 2015-2018 WNW .....	40
Ilustración 15: Rosa de dispersión Tp/Dir datos UV Junio-Julio 2015-2018 W .....	41
Ilustración 16: Rosa de dispersión Tp/Dir ADCP junio-julio 2015-2018 WNW .....	41
Ilustración 17: Rosa de dispersión Tp/Dir ADCP junio-julio 2015-2018 W.....	42
Ilustración 18: Ajuste por mínimos cuadrados junio-julio 2015-2018 WNW.....	42
Ilustración 19: Ajuste por mínimos cuadrados junio-julio 2015-2018 W.....	43
Ilustración 20: Espectro direccional sintético JONSWAP .....	45
Ilustración 21: Desnivelaciones asociadas al espectro JONSWAP .....	45
Ilustración 22: Ubicación nodos de registro.....	46
Ilustración 23: Desnivelaciones calculadas por: a) Lynett et al. (2002), b) SWASH y c) Celeris para diferentes instantes de tiempo. Fuente: a) Lynett et al. (2002), b) y c) Elaboración propia.....	48
Ilustración 24: Movimiento de la línea de costa por: a) Lynett et al. (2002), b) SWASH y c) Celeris para diferentes instantes de tiempo. Fuente: a) Lynett et al. (2002), b) y c) Elaboración propia.....	49
Ilustración 25: Desnivelaciones y run-up del modelo Celeris con altura inicial 0.02 [m] con pendiente 0.04.....	50
Ilustración 26: Movimiento de la línea de costa modelo Celeris con altura inicial 0.02 [m]. .....	51
Ilustración 27: Run-up y run-down para una pendiente de 0.04, ambos modelos. ....	52
Ilustración 28: Desnivelaciones con una pendiente de 0.13, por: a) SWASH y b) Celeris.53	
Ilustración 29: Desnivelaciones con una pendiente de 0.26, por: a) SWASH y b) Celeris.54	
Ilustración 30: Run-up y run-down para una pendiente de 0.13 ambos modelos. ....	55
Ilustración 31: Run-up y run-down para una pendiente de 0.26, ambos modelos. ....	56
Ilustración 32: Comparación de Run-up con pendientes 0.04, 0.13 y 0.26.....	57
Ilustración 33: Comparación de Run-down con pendientes 0.04, 0.13 y 0.26 .....	57
Ilustración 34: Espectro sintético JONSWAP. ....	58
Ilustración 35: Desnivelaciones asociadas al espectro JONSWAP .....	58
Ilustración 36: Batimetría ideal en elevación con pendiente 0.2. ....	60
Ilustración 37: Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) $T_p=6$ [s] .....	61
Ilustración 38: Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) $T_p=11$ [s].....	62

Ilustración 39: a) Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) $T_p=17$ [s]. b) Gráfico 3D Run-up y rompiente. c) Gráfico 3D Run-down. ....	63
Ilustración 40: Propagación de oleaje con el modelo SWASH. a) 0.5 [s], b) 60.5 [s], c) 120.5 [s] y d) 180.5 [s] .....	65
Ilustración 41: Ejemplo de desnivelaciones en nodo sitio 9.....	66
Ilustración 42: Espectro de frecuencias.....	67
Ilustración 43: Espectro direccional.....	67
Ilustración 44: Histograma de alturas significativas espectrales sitio 9.....	68
Ilustración 45: Histograma de direcciones peak sitio 9.....	69
Ilustración 46: Curva de excedencia $H_{m0}$ sitio 9.....	69
Ilustración 47: Histograma de alturas significativas espectrales nodo sitio 9, SWASH.....	71
Ilustración 48: Histograma de direcciones peak nodo sitio 9, SWASH.....	72
Ilustración 49: Curva de excedencia $H_{m0}$ nodo sitio 9, SWASH.....	72
Ilustración 50: Histograma combinado de $H_{m0}$ , SWASH y registros sitio 9. ....	74
Ilustración 51: Correlación entre modelo SWASH y datos sitio 9 .....	75
Ilustración 52: Histograma de alturas significativas espectrales, nodo sitio 9 Celeris.....	76
Ilustración 53: Histograma de direcciones peak, nodo sitio 9 Celeris.....	77
Ilustración 54: Curva de excedencia $H_{m0}$ nodo sitio 9 Celeris.....	77
Ilustración 55: Histograma combinado de $H_{m0}$ , Celeris y registros sitio 9 .....	79
Ilustración 56: Correlación entre modelo Celeris y datos sitio 9 .....	80
Ilustración 57: Algoritmo de reducción cíclica y su implementación en la GPU .....	97
Ilustración 58: Histograma de alturas significativas espectrales 1990-2018 .....	98
Ilustración 59: Gráfico de no excedencia alturas significativas espectrales 1990-2018 ....	98
Ilustración 60: Histograma de periodos peak espectrales 1990-2018. ....	99
Ilustración 61: Histograma de direcciones medias 1990-2018 .....	99
Ilustración 62: Rosa de dispersión, Período peak v/s Dirección media, 1990-2018.....	100
Ilustración 63: Histograma de alturas significativas espectrales ADCP 2015-2018 .....	101
Ilustración 64: Gráfico de no excedencia alturas significativas espectrales ADCP 2015-2018 .....	102
Ilustración 65: Histograma de periodos peak espectrales ADCP 2015-2018 .....	102
Ilustración 66: Histograma de direcciones medias ADCP 2015-2018.....	103
Ilustración 67: Rosa de dispersión, Período peak v/s Dirección media. ....	104
Ilustración 68: Histograma de alturas significativas sitio 9.....	106
Ilustración 69: Gráfico de excedencia alturas significativas espectrales sitio 9 junio-julio 2010 .....	106
Ilustración 70: Histograma de periodos peak sitio 9.....	107
Ilustración 71: Histograma de dirección sitio 9 .....	107
Ilustración 72: Histograma de alturas significativas nodo 2 Celeris .....	109
Ilustración 73: Histograma de direcciones peak nodo 2 Celeris .....	109
Ilustración 74: Curva de excedencia $H_{m0}$ nodo 2 Celeris .....	110
Ilustración 75: Histograma de alturas significativas nodo 3 Celeris .....	111
Ilustración 76: Histograma de direcciones peak nodo 3 Celeris .....	112
Ilustración 77: Curva de excedencia $H_{m0}$ nodo 3 Celeris .....	112
Ilustración 78: Histograma de alturas significativas nodo 2 SWASH .....	114
Ilustración 79: Histograma de direcciones peak nodo 2 SWASH .....	114
Ilustración 80: Histograma de alturas significativas nodo 3 SWASH .....	116
Ilustración 81: Histograma de direcciones peak nodo 3 SWASH .....	116

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de incidencia datos ajustados W .....	43
Tabla 2: Tabla de incidencia datos ajustados WNW .....	44
Tabla 3: Tabla de incidencia datos sitio 9, Altura significativa espectral/Período peak.....	70
Tabla 4: Tabla de incidencia datos sitio 9, Altura significativa espectral/Dirección peak. .	70
Tabla 5: Tabla de incidencia datos sitio 9, Período peak/Dirección peak. ....	70
Tabla 6: Tabla de incidencia sitio 9 SWASH, Altura significativa espectral/Período peak	73
Tabla 7: Tabla de incidencia datos sitio 9 SWASH, Altura significativa espectral/Dirección peak.....	73
Tabla 8: Tabla de incidencia datos sitio 9 SWASH, Período peak/Dirección peak .....	73
Tabla 9: Comparación de ocurrencias en intervalos, SWASH y registros sitio 9. ....	74
Tabla 10: Tabla de incidencia sitio 9 Celeris, Altura significativa espectral/Período peak	78
Tabla 11: Tabla de incidencia datos sitio 9 Celeris, Altura significativa espectral/Dirección peak.....	78
Tabla 12: Tabla de incidencia datos sitio 9 Celeris, Período peak/Dirección peak .....	79
Tabla 13: Comparación de ocurrencias en intervalos, SWASH y registros sitio 9. ....	80
Tabla 14: Tabla de incidencia Hm0/Tp, 1990-2018.....	100
Tabla 15: Tabla de incidencia Hm0/Dirección media, 1990-2018.....	101
Tabla 16: Tabla de incidencia Hm0/Tp.....	104
Tabla 17: Tabla de incidencia Hm0/MWD .....	105
Tabla 18: Tabla de incidencia Hm0/Tp sitio 9 .....	108
Tabla 19: Tabla de incidencia Hm0/Dir sitio 9 .....	108
Tabla 20: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 2 Celeris .....	110
Tabla 21: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 2 Celeris.....	110
Tabla 22: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 2 Celeris .....	111
Tabla 23: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 3 Celeris .....	113
Tabla 24: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 3 Celeris.....	113
Tabla 25: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 3 Celeris .....	113
Tabla 26: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 2 SWASH .....	115
Tabla 27: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 2 SWASH.....	115
Tabla 28: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 2 SWASH .....	115
Tabla 29: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 3 SWASH .....	117
Tabla 30: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 3 SWASH.....	117
Tabla 31: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 3 SWASH .....	117

## **RESUMEN**

En este proyecto se realizó una comparación de dos tipos de modelos, los modelos que resuelven las ecuaciones de Boussinesq y los que resuelven las ecuaciones No Lineales de Aguas Someras. Estos son utilizados para realizar propagaciones de oleaje desde aguas intermedias a someras, así como también modelaciones de agitación dentro de los puertos. Ambos tipos de modelos fueron comparados en batimetrías ideales y en un caso real en el puerto de San Antonio.

Para esto se utilizaron los modelos de oleaje SWASH (Simulating WAVes till SHore), que resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras (NSWE) y Celeris, que resuelve las ecuaciones modificadas de Boussinesq.

Para el estudio de varios casos se usaron distintas batimetrías, las batimetrías ideales utilizadas debían poseer ciertas características, como por ejemplo una playa con pendiente 0.04, con esto se buscó representar un caso donde los efectos no lineales fueran mayores. En otros casos se empleó una batimetría con una pendiente pronunciada (0.13 y 0.26), donde los efectos no lineales no fueran un problema. Finalmente, en el caso del Puerto de San Antonio se buscó conocer que tan representativos eran los resultados en una zona donde la batimetría es compleja.

Los resultados obtenidos mostraron que para casos donde la no linealidad predomina la mejor opción fue utilizar un modelo no lineal de aguas someras, ya que fue capaz de representar los fenómenos costeros asociados. El modelo Boussinesq tuvo un comportamiento deficiente en estas situaciones, ya que la dispersión de frecuencia que poseen las ecuaciones de gobierno evitó el desarrollo de fenómenos no lineales. Sin embargo, su comportamiento fue apto para modelaciones fuera del borde costero.

Como conclusión el modelo que mejor comportamiento tuvo para el caso particular de San Antonio fue SWASH. Al tener un cañón en el fondo marino las profundidades relativas son variadas, sin embargo, al aproximarse a la costa representó este problema de buena manera. Las direcciones fueron más acotadas en la modelación que en el registro del sitio 9, no concordando completamente.