



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) Tp=6 [s]	61
Ilustración 38: Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) Tp=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.

1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país costero con 6.435 Km de costa, donde se realizan una gran variedad de actividades, como la pesca, el transporte de carga, y el transporte de personas, entre otros (Gobierno de Chile, 2020).

Para el correcto funcionamiento de los puertos y las caletas es necesario que se cuente con las condiciones de abrigo óptimas para una buena operatividad. Al iniciar la construcción de una estructura costera o modificar un sector que ya cuente con una, se debe garantizar que se genere el escenario apropiado para un desempeño óptimo (R.O.M. Ministerio de Transportes, España, 2012). Para ello se realizan modelaciones numéricas, con las cuales se prevé cómo afectará el oleaje al sector de la obra, para así disminuir las incertidumbres que se puedan presentar en el futuro y estimar de qué forma se verá afectada una zona costera. Estas modelaciones deben ser lo más representativas de la realidad posible.

En el ámbito de la ingeniería marítima se pueden realizar propagaciones de oleaje con distintos métodos. Pueden ser utilizados modelos numéricos, los cuales resuelven el problema por medio de algoritmos en un computador, o mediante modelos físicos, donde se construye a escala el lugar que se pretende representar.

Los modelos numéricos son variados, cada uno cuenta con pros y contras, además que son utilizados dependiendo del lugar en el que se desee obtener resultados. Existen profundidades a las cuales cada uno de ellos es capaz de representar de mejor manera los fenómenos físicos del oleaje. Las profundidades relativas son: aguas profundas, aguas intermedias y aguas someras. En este proyecto los modelos que se utilizan son capaces de obtener resultados desde aguas intermedias a someras.

Se evalúan dos modelos: SWASH (Simulating WAVes till SHore) que resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras y Celeris, que resuelve las ecuaciones de Boussinesq. Ambos modelos son comparados con el fin de determinar cuál de estos tiene un mejor comportamiento en un caso real con una batimetría compleja. El motivo de esto es tener una base sobre qué tipo de modelo representa de mejor forma la realidad del problema.

Los resultados de ambos modelos son comparados con datos obtenidos de un mareógrafo ubicado en el sitio 9 de San Antonio.

2. OBJETIVOS

El objetivo de esta memoria es determinar qué modelo ya sea SWASH o Celeris, se aproxima de mejor forma a los datos obtenidos en el sitio 9 del puerto de San Antonio.

Los objetivos específicos son:

- Comparar ambos modelos con el experimento realizado por Lynett, Wu, & Liu (2002), obteniendo desnivelaciones, distancias de run-up y run-down, para conseguir valores de referencia para cada modelo.
- Determinar el coeficiente de asomeramiento para los modelos en una batimetría ideal a escala real, para cuantificar las diferencias en esa condición.
- Correlación de los datos en la condición de borde inicial de la malla de cálculo para la modelación en el puerto de San Antonio.
- Obtener los espectros de energía y dirección a partir de las desnivelaciones registradas como resultado de las modelaciones en el sitio 9, para luego procesar los parámetros de resumen.
- Obtener las correlaciones de los parámetros de resumen de los modelos versus lo datos registrados en el sitio 9.

3. ALCANCES Y LIMITACIONES

Este trabajo fue desarrollado específicamente para el puerto de San Antonio y para las batimetrías ideales, utilizando consideraciones y simplificaciones que no deben ser consideradas para otros sectores ni como una representación completamente verás del puerto.

Los datos de campo disponibles para la calibración, validación y comparación de la modelación en San Antonio fueron escasos.

Debido a que el tiempo necesario para cada modelación fue muy alto, se utilizaron distintos tipos de computadores para realizar las modelaciones. Primero se utilizó un computador convencional, seguido del computador facilitado por la Universidad de Valparaíso, hasta llegar al Laboratorio Nacional para Cálculo de Alto Rendimiento (NLHPC por sus singlas en inglés) Leftraru.

Para los casos ideales presentados en la memoria no hubo limitaciones.

Las limitaciones para el caso real fueron:

- El hardware, que limitó la cantidad de casos a modelar.
- La densidad y la cobertura de los datos batimétricos de la zona escogida.
- Los pocos datos de oleaje del ADCP en la entrada del puerto.
- Los escasos datos de altura significativa, período peak y dirección peak dentro de la dársena del puerto. Sólo se dispuso de un mes y medio en el sitio 9.
- Las distintas configuraciones para ingresar y definir condiciones de entrada, borde y batimetría entre los modelos. Lo que se tradujo en realizar ciertos ajustes para que ambos resolvieran exactamente el mismo caso.
- La falta de herramientas y configuraciones que aún posee el modelo Celeris.
- La variabilidad de las profundidades que posee el puerto de San Antonio debido al cañón.
- El tiempo en el proceso de obtención de los resultados (numéricos y gráficos).

4. MARCO TEÓRICO

Este trabajo está enfocado en la comparación de modelos de propagación de oleaje, que resuelven las ecuaciones de Boussinesq y las ecuaciones No Lineales de Aguas Someras.

Se utilizan ambos modelos en batimetrías ideales con distintas pendientes y a distintas escalas, además de un caso real en el puerto de San Antonio.

4.1 FÍSICA DEL OLAJE

El oleaje es un fenómeno que está determinado por la acción de las fuerzas de la naturaleza en cualquier superficie libre de agua, las cuales condicionan el tipo de ola que será inducida. La más obvia de estas fuerzas es la acción del viento sobre la superficie del mar (Silva Casarín, 2005).

El oleaje es considerado una superposición de ondas con distintas direcciones, periodos, alturas y energía. Se forma a partir de las rachas de viento creadas a partir de las variaciones de presión, temperatura, y densidad en la atmosfera. Estas rachas generan esfuerzos en la superficie libre del agua, lo que produce pequeñas ondulaciones que van aumentando de tamaño a medida que la longitud de la onda también aumenta. Estas ondas pueden viajar miles de kilómetros incrementando su tamaño y celeridad hasta alcanzar el equilibrio, lo que se denomina oleaje desarrollado, obteniendo periodos entre 3 a 27 [s] aproximadamente. Al llegar a la costa se ven afectadas por procesos como el asomeramiento, la difracción, la refracción, la reflexión y la rotura. (Silva Casarín, 2005)

El oleaje está definido de acuerdo a las profundidades en las que se propaga, estas zonas se dividen en tres, aguas profundas, intermedias y someras. Aguas profundas se define como la zona en la que el oleaje no siente el fondo, por tanto, es capaz de propagarse libremente sin ningún obstáculo. Aguas intermedias es la zona donde las olas comienzan a acercarse a la costa y comienzan a sentir el fondo, disminuyen gradualmente su longitud y celeridad, pero incrementa su altura. Aguas someras corresponde al sector donde el oleaje ya se encuentra en la costa, por tanto, comienzan los fenómenos no lineales como la rotura, su celeridad está muy disminuida al igual que su longitud. (Silva Casarín, 2005)

A medida que el oleaje se aproxima a la costa sufre diversos procesos costeros, los cuales son: asomeramiento, refracción, difracción y reflexión. Estos se describen a continuación.

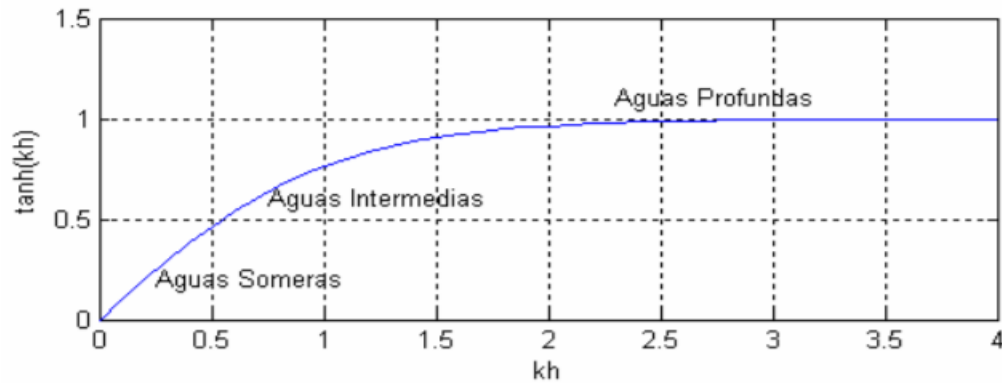


Ilustración 1: Zonas de propagación del oleaje

Fuente: (GUZMAN MARDONES, 2006)

Donde:

kh : Profundidad relativa ($kh = \frac{2\pi}{L} * h$).

k : Número de onda.

h : Profundidad.

L : Longitud de onda.

El **asomeramiento** es el fenómeno por el cual las olas aumentan su tamaño debido a la variación de la profundidad (Ilustración 2), esta relación se expresa como $\frac{d}{L} \geq \frac{1}{2}$, donde L es la longitud de onda y d es la profundidad desde la cual la ola comienza a sentir el fondo (Department of the Army, 1984).

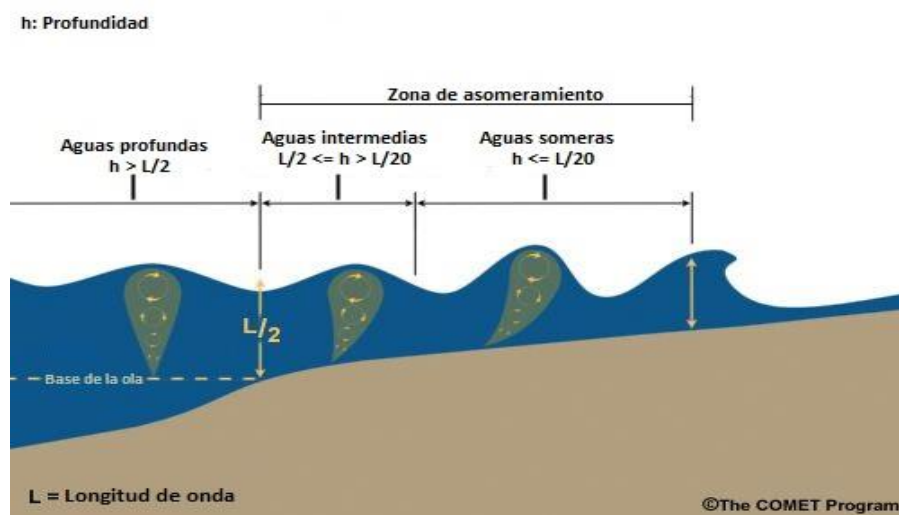


Ilustración 2: Proceso de asomeramiento

Fuente: UCAR Community programs, The COMET Program

La **refracción** es el proceso por el cual los trenes de olas se ven afectados a un cambio de dirección (Ilustración 3). Las olas, producto de un fondo variable y de una dirección de propagación oblicua, viajan a distintas celeridades debido al asomeramiento. Una parte del tren de olas se encuentra en aguas menos profundas, por lo que las olas pueden tener un cambio de dirección (Universidad de Cantabria, 2000).

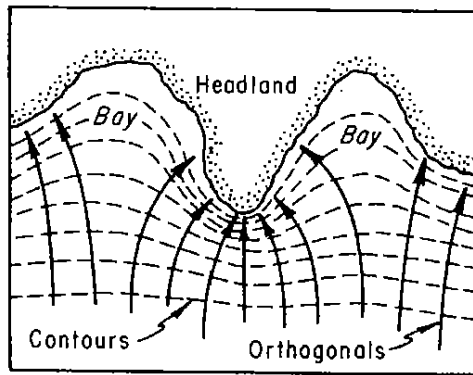


Ilustración 3: Proceso de refracción

Fuente: UNICAN Vol. 1, Dinámicas

La **difracción** se caracteriza por una cesión de energía en el sentido perpendicular a la dirección de la propagación. La ola presenta grandes variaciones por la presencia de un obstáculo o cuando efectos pronunciados de la refracción conducen a singularidades en la amplitud de la onda. La difracción tiene especial importancia en el diseño portuario, especialmente cuando se dan zonas de alta concentración de energía (Universidad de Cantabria, 2000).

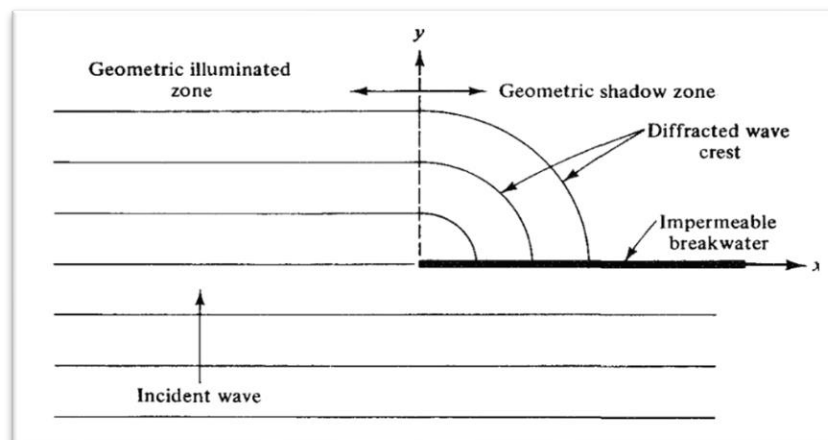


Ilustración 4: Fenómeno de difracción

Fuente: Dean & Dalrymple (1984)

La **reflexión** se produce cuando una ola se aproxima a la costa y es afectada por estructuras naturales o artificiales. La reflexión puede cambiar por completo el campo de ondas inducido por ondas incidentes, dando lugar a patrones complejos en la zona de rotura, cambios en el nivel de disipación en la playa, en el set-up, en sistemas de corrientes y el transporte de sedimentos asociado. Por lo tanto, la determinación del campo de ondas existentes frente a una estructura reflejante natural o artificial, será de vital importancia si se desea determinar adecuadamente los flujos en sus proximidades, su morfodinámica o su estabilidad (Universidad de Cantabria, 2000).

Se define el **Run-Up** como la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el máximo nivel que alcanza la superficie libre del agua sobre alguna estructura o playa. Mientras que el **Run-down** es la distancia vertical desde el nivel medio en reposo hasta el mínimo nivel que alcanza la superficie libre del agua sobre la estructura o playa sometida al oleaje.

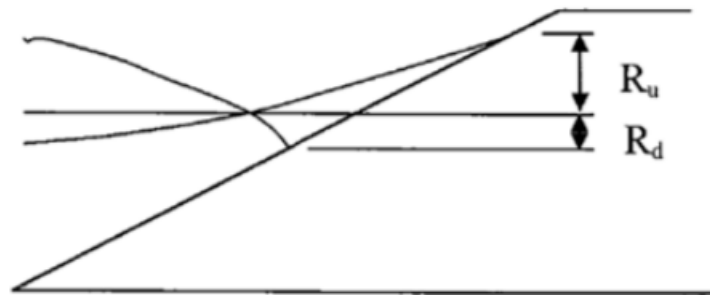


Ilustración 5 : Esquema de run-up y run-down

Fuente: Determinación de run-up por oleaje en laboratorio en taludes de presas mediante procesamiento de imágenes (Velasco, Juan (2016))

Existen muchos otros procesos que se producen en la zona costera, entre los cuales se encuentran la disipación por el fondo marino, disipación por percolación, rotura de la ola, interacciones ola a ola, etc. (Universidad de Cantabria, 2000).

4.2 TEORÍAS DE OLEAJE

Actualmente, para propagar oleaje existen una variedad de modelos numéricos, y cuya aplicación dependen principalmente de la profundidad donde se busque resolver el problema (aguas profundas, intermedias o someras). Para realizar la propagación, cada modelo cuenta con ecuaciones de gobierno que han sido adaptadas numéricamente por medio de algoritmos mucho más eficientes.

En función de su no linealidad existen dos tipos de teorías. La teoría lineal de oleaje o teoría de ondas de pequeña amplitud, que es utilizada principalmente para ondas gravitatorias en aguas profundas, y la teoría no lineal de oleaje o de onda larga, que se emplea en profundidades relativas de aguas intermedias a someras.

4.2.1 TEORÍA LINEAL DEL OLEAJE

La teoría más simple sobre generación de oleaje es la Teoría de Airy o teoría lineal de olas, la cual describe el movimiento de las olas en aguas profundas e intermedias, no siendo recomendable aplicarla en aguas someras (Guisado et al, 2010).

La teoría lineal del oleaje considera una serie de simplificaciones que limitan su aplicación a ondas de pequeña amplitud ($\frac{a}{h} \ll 1$) y profundidades intermedias a profundas ($\frac{h}{L} > \frac{1}{25}$).

La teoría lineal del oleaje considera las siguientes simplificaciones.

- Profundidad constante (fondo plano).
- Fenómeno bidimensional (oleaje de frente largo).
- Oleaje de forma y periodo constantes.
- Flujo irrotacional.
- Presión en la superficie uniforme y constante.
- Fluido incompresible, homogéneo y continuo.
- No se considera viscosidad, turbulencia ni tensión superficial.
- Se desprecia el efecto de Coriolis.
- La altura de la ola es mucho menor que su longitud ($H/L \rightarrow 0$).

4.2.2 TEORIAS NO LINEALES DEL OLEAJE

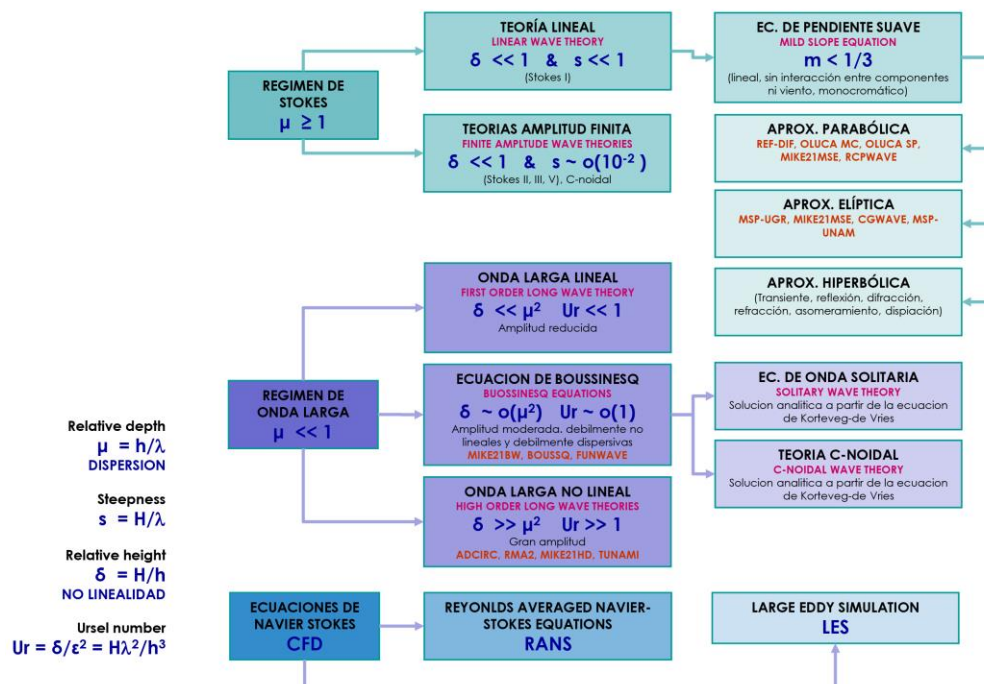


Ilustración 6: Teorías de ondas.

Fuente: Winckler (2017).

De acuerdo a Winckler (2017) “Los modelos que resuelven la fase se dividen en los regímenes de Stokes y de onda larga, según se muestra en la Ilustración 5, en la que también se incluyen algunos software comúnmente utilizados en la práctica de ingeniería oceánica. El régimen de Stokes es muy apropiado para aplicaciones en aguas profundas (e.g. plataformas petrolíferas, artefactos flotantes, dispositivos de generación de energía, entre otros) y su aplicación, a excepción del caso particular de la teoría lineal del oleaje, es poco frecuente para nuestra realidad”.

Estas ecuaciones se pueden utilizar para el modelado de una serie de ondas largas, es decir, oleaje en aguas someras, mareas, tsunamis, mareas meteorológicas (storm surge), corrientes oceánicas (en la medida que no exista estratificación vertical), entre otros. Específicamente se utilizan para estudiar la propagación del oleaje en aguas someras, que es la materia de estudio. Las teorías de ondas largas se dividen en varias aproximaciones.

- Las **Ecuaciones no lineales de aguas someras** o Nonlinear Shallow Water Equations en inglés (NSWE), permiten resolver la fase de las olas propagándose en profundidades intermedias a someras. Las ecuaciones de onda larga corresponden a una versión simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes y reducen el dominio de tres dimensiones $X = (x, y, z)$ a dos $X = (x, y)$ usando el supuesto de que el flujo tiene una variación despreciable en la profundidad ya que la variación horizontal es mucho mayor que la vertical (Winckler Grez, 2017).
- Las **Ecuaciones de tipo Boussinesq** son una aproximación para ondas largas débilmente dispersivas. Son válidas para modelar la propagación desde profundidades intermedias hasta someras, y resuelven de manera explícita el efecto de la dispersión de frecuencia. Las ecuaciones de Boussinesq son integradas en la profundidad y se basan en el supuesto de que los términos no lineales y dispersivos son mucho menores que los inerciales (Peregrine, 1967).

4.3 MODELOS UTILIZADOS ACTUALMENTE

Actualmente existen una gran variedad de modelos numéricos para el desarrollo de la ingeniería costera y oceánica. Para aguas intermedias a someras se encuentran los que resuelven las ecuaciones de Boussinesq y los que resuelven las ecuaciones no lineales de aguas someras. Los modelos más utilizados son el Mike21BW, Mike21HD, BOUSSQ, entre otros.

El problema de algunos de estos modelos es que son adquiridos bajo licencia con un costo asociado. En la actualidad existen modelos de código abierto (Open source en inglés) de una gran calidad, entre los cuales se encuentran SWASH (Simulating WAVes till Shore) de Delft University, y Celeris creado por Sasan Tavakkol y Patrick Lynett de University of Southern California. (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011), (Tavakkol & Lynett, 2017)

4.3.1 SWASH, MODELO DE PROPAGACIÓN NO LINEAL

La filosofía básica del modelo SWASH es proporcionar un modelo eficiente y robusto que permita aplicar una amplia gama de escalas de tiempo, espacios de ondas superficiales y flujos de aguas poco profundas en entornos complejos. Como resultado, SWASH permite que todo el proceso de modelado se lleve a cabo en cualquier área de interés (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011).

Los modelos no hidrostáticos consisten en las ecuaciones no lineales de aguas someras, con la adición de una ecuación de momento vertical, una ecuación de momento horizontal y con una presión no hidrostática. Además, las NSWE con propiedades de conservación apropiadas son capaces de tratar con precisión grandes gradientes o discontinuidades en el flujo, tales como saltos hidráulicos y bores.

La evolución del código SWASH para uso operativo combina los siguientes elementos y características principales:

- Se basa en un método explícito de diferencia finita de segundo orden para cuadrículas escalonadas, en el que la masa y el momento se conservan estrictamente. Como consecuencia, este esquema simple y eficiente, es capaz de rastrear la ubicación real de la rotura del oleaje. Además, la conservación del momento permite que las ondas rotas se propaguen con un cambio gradual de la forma, y se asemejen a los bores constantes en una etapa final.
- Con respecto a la integración temporal de las ecuaciones de continuidad y momento, se adopta el esquema salto de rana de segundo orden Hansen, (1956), ya que no altera la amplitud de la onda mientras su dispersión numérica es favorable.
- Para una representación adecuada de la interfaz entre el agua y la tierra, se adopta un enfoque simple que rastrea la línea de costa en movimiento, asegurando profundidades de agua no negativas en las aproximaciones de flujo de momento.

4.3.1.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

Las ecuaciones a continuación se introducen en términos de notación cartesiana. Para simplificar las expresiones sin introducir una pérdida significativa de generalidad, la atención se centra en el flujo promediado en un dominio físico horizontal bidimensional. La extensión al marco tridimensional se elabora en Zijlema y Stelling (2005-2008) y Zijlema et al. (2011).

El flujo no hidrostático promediado en la profundidad, se puede describir mediante las ecuaciones no lineales de aguas someras, que a su vez se pueden derivar de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes que comprenden la conservación de la masa y el momento (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011). Estas ecuaciones están dadas por:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} u + \frac{\partial h}{\partial y} v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

Donde:

t :	Tiempo.
x e y :	Están localizados en el nivel del agua.
z :	Eje con dirección positiva.
$\eta(x, y, t)$:	Elevación de la superficie medida desde el nivel de agua.
$d(x, y)$:	Profundidad del agua.
$h = (\eta + d)$:	Profundidad total.
$u(x, y, t)$ y $v(x, y, t)$:	Velocidades de flujo promediadas en la profundidad en las direcciones x e y respectivamente.
$q(x, y, z, t)$:	Presión no hidrostática (normalizada por la densidad).
g :	Aceleración de gravedad.
c_f :	Coeficiente de fricción de fondo adimensional.
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$:	Términos de estrés turbulento horizontal.

Se debe considerar que las ecuaciones de momento (2) y (3) están escritas en una forma no conservativa.

4.3.1.2 CONDICIONES DE BORDE

Para completar el sistema de ecuaciones, se necesita imponer condiciones de borde apropiadas en los extremos abiertos de la malla de cálculo. En los bordes del modelo fuera de la costa se introduce un oleaje regular e irregular. Para simular el ingreso de olas sin reflexiones en este límite, se adopta una condición débilmente reflexiva que permite que las olas salgan de la malla de cálculo (Zijlema et al., 2011).

$$u_b = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} (2\eta_b - \eta) \quad (4)$$

Donde:

u_b :	Es la velocidad de entrada en límite.
η_b :	Es la elevación de superficie de la ola incidente.

El signo en la ecuación (4) depende de la ubicación del borde. El signo positivo se refiere a una velocidad de entrada en los límites Oeste y Sur, y el signo negativo a la velocidad de entrada en Este y Norte.

Suponiendo que las olas entrantes y salientes son perpendiculares al límite. Se ha demostrado que este tipo de condiciones de radiación conducen a buenos resultados con olas cercanas a la costa. Para las olas regulares, la señal incidente puede ser una serie temporal o una serie de Fourier.

Según Zijlema et al. (2011), las olas irregulares generalmente se tratan como realizaciones de un proceso Gaussiano estacionario que puede describirse por medio de una serie de Fourier. Por simplicidad las ecuaciones están escritas para ondas unidireccionales, aunque SWASH también permite especificar ondas multidireccionales. Utilizando la teoría lineal de ondas, la velocidad a una profundidad se encuentra mediante la superposición lineal de N ondas armónicas cuya amplitud se determina al muestrear una densidad espectral cuya fase se elige al azar para cada realización:

$$u_b(z, t) = \sum_{j=1}^N a_j \left[\omega_j \frac{\cosh k_j(z + d)}{\sinh k_j h} + \sqrt{\frac{g}{h}} \right] \cos(\omega_j t - \alpha_j) - \sqrt{\frac{g}{h}} \eta \quad (5)$$

Donde:

- u_b : Velocidad en la profundidad.
- t : Tiempo.
- a_j : Amplitud.
- k_j : Número de onda.
- α_j : Fase aleatoria.
- ω_j : Frecuencias.
- z : Eje con dirección positiva en la vertical.
- d : Profundidad del agua.
- h : Profundidad total.
- g : Aceleración de gravedad.

El rango de frecuencia se resuelve uniformemente con un intervalo de frecuencia $\Delta\omega$, es decir, $\omega_j = j\Delta\omega$

Para un espectro de ondas dado $E(\omega)$, se puede sintetizar una serie temporal calculando la amplitud de cada armónico, de la siguiente manera.

$$a_j = \sqrt{2E(\omega_j)\Delta\omega} \quad (6)$$

Para este modelo enfocado en aguas someras es conveniente utilizar el espectro llamado TMA, que puede emplearse para generar características de onda que ocurren en aguas menos profundas (Zijlema et al, 2011).

Se considera un límite en tierra ubicado en la zona pre-rompiente, en donde se impone una condición de absorción. Por lo general, se emplea la condición de radiación de Sommerfeld, que permite que las ondas de periodo largo (ondas largas) crucen el borde de la malla de cálculo sin reflexión. Para el caso específico de un límite paralelo al eje y , la condición está dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

La condición de radiación puede ser combinada con una capa de esponja en los bordes, para eliminar la reflexión producida por ondas cortas.

4.3.1.3 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA.

El modelo SWASH emplea un método de diferencias finitas en una malla curvilínea ortogonal y escalonada de las ecuaciones de gobierno. Como forma de simplificar el problema, estos principios se desarrollarán por medio de las ecuaciones de aguas poco profundas en una dimensión y profundidades promediadas de forma no conservativa. En las ecuaciones 8 y 9 se presentan las ecuaciones de conservación de la masa y momento, en las ecuaciones 10 y 11 las ecuaciones de velocidad vertical en el fondo y la conservación de la masa local (Zijlema et al, 2011).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2h} \frac{\partial (q_b - d)}{\partial x} + c_f \frac{u|u|}{h} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h v_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{2q_b}{h} - \frac{\partial w_b}{\partial t}, w_b = -u \frac{\partial d}{\partial x} \quad (10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{w_s - w_b}{h} = 0 \quad (11)$$

Donde:

t :	Tiempo.
x e y :	Están localizados en el nivel del agua.
z :	Eje con dirección positiva.
$\eta(x, y, t)$:	Elevación de la superficie medida desde el nivel de agua.
$d(x, y)$:	Profundidad del agua.
$h = (\eta + d)$:	Profundidad total.
$u(x, y, t)$ y $v(x, y, t)$:	Velocidades de flujo promediadas en la profundidad, en las direcciones x e y respectivamente.
g :	Aceleración de gravedad.
c_f :	Coeficiente de fricción de fondo adimensional.
q_b :	Presión no hidrostática en el fondo.
w_s :	Velocidad en la dirección z de la superficie libre.
w_b :	Velocidad en el fondo.

Se considera una cuadrícula regular de una dimensión $\{x_{i+\frac{1}{2}}|x_{i+\frac{1}{2}} = i\Delta x, i = 0, \dots, I\}$ con I el número de mallas de la cuadrícula y Δx la longitud de la malla de la cuadrícula. La localización del centro de la celda está dada por $x_i = (x_{i-\frac{1}{2}} + x_{i+\frac{1}{2}})/2$. Se utiliza una convención de cuadrícula escalonada en la que el componente de velocidad u y la elevación de la superficie η , se ubican en $i + 1/2$ e i , respectivamente. La cuadrícula escalonada evita el desacoplamiento de las incógnitas, que de otro modo podrían causar oscilaciones no físicas en cuadrículas no escalonadas. Las variables d, q_b, v_t, w_b y w_s están ubicadas en i . Como consecuencia, la profundidad del agua h se da en el punto i (Zijlema et al, 2011).

La implementación numérica completa se incluye en el anexo B.

4.3.2 CELERIS, MODELO DE PROPAGACIÓN BOUSSINESQ

La investigación con las ecuaciones de Boussinesq ha llevado a cambios en la simulación de ingeniería costera en las últimas décadas. Estas ecuaciones son potentes para el estudio de la dinámica costera, incluidos los efectos no lineales y dispersivos. Las ecuaciones de Boussinesq son capaces de simular ondas relativamente cortas, pero son computacionalmente más costosas que sus contrapartes las ecuaciones no lineales de aguas someras (NSWE). El esfuerzo computacional necesario dificulta las simulaciones en tiempo real, lo que requiere un procesamiento paralelo de docenas a cientos de núcleos de CPU (Central Processing Unit) para lograrlo. Para lograr una alta velocidad computacional, el modelo Celeris resuelve las ecuaciones usando la GPU (Graphics Processing Unit), proporcionando una velocidad de simulación mucho más rápida, esto debido a la arquitectura con la cual están construidas las GPU, que permiten una gran cantidad de cálculos paralelos (Cuda cores) (Tavakkol & Lynett, 2017).

4.3.2.1 ECUACIONES DE GOBIERNO

Las ecuaciones extendidas de Boussinesq derivadas por Madsen & Sørensen (1992), son un conjunto adecuado para un esquema híbrido de diferencias finitas de volumen finito. Estas ecuaciones para flujos 2DH se presentan a continuación en su forma conservativa (Tavakkol & Lynett, 2017).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{h} \right) + gh \frac{\partial z_x}{\partial x} + \psi_1 + f_1 = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{h} + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{h} \right) + gh \frac{\partial z_y}{\partial y} + \psi_2 + f_2 = 0 \quad (14)$$

Donde:

η :	Elevación de la superficie.
h :	Profundidad total.
P y Q :	Flujos de masa integrados en la profundidad en las direcciones x e y respectivamente.
f_1 y f_2 :	Términos de fricción de fondo.
g :	Coeficiente de aceleración de gravedad.
ψ_1 y ψ_2 :	Términos dispersivos modificados.
z :	Elevación del fondo medido desde un dato fijo.
t :	Tiempo.

Los subíndices x e y indican la diferenciación espacial, con respecto a la dirección correspondiente, y el subíndice t denota la diferenciación temporal.

Los términos dispersivos modificados fueron obtenidos por Madsen & Sørensen (1992), y se definen a continuación.

$$\begin{aligned} \psi_1 = & - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xxt} + Q_{xyt}) - Bgd^3 (\eta_{xxx} + \eta_{xyy}) \\ & - dd_x \left(\frac{1}{3} P_{xt} + \frac{1}{6} Q_{yt} + 2Bgd\eta_{xx} + Bgd\eta_{yy} \right) - dd_y \left(\frac{1}{6} Q_{xt} + Bgd\eta_{xy} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \psi_2 = & - \left(B + \frac{1}{3} \right) d^2 (P_{xyt} + Q_{yyt}) - Bgd^3 (\eta_{yyy} + \eta_{xxy}) \\ & - dd_x \left(\frac{1}{3} Q_{yt} + \frac{1}{6} P_{xt} + 2Bgd\eta_{yy} + Bgd\eta_{xx} \right) - dd_y \left(\frac{1}{6} P_{yt} + Bgd\eta_{xy} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Donde:

d :	Profundidad del agua.
B :	Es igual a $1/5$, que corresponde al coeficiente de calibración para propiedades dispersivas de la ecuación (Madsen & Sørensen, 1992).
η :	Es igual a $(w - w_s)$, donde w es la elevación de la superficie y w_s es la elevación de la superficie del agua en reposo, ambas medidas a partir del nivel cero.
w :	Es $h + z$.

Las ecuaciones extendidas de Boussinesq proporcionan características de dispersión lineal y compactación suficientemente precisas para valores de $kd < 3$, donde k es el número de ola. En lugares donde la elevación de la superficie del agua aún no está definida (como en tierra) se define $d = 0$ (Tavakkol & Lynett, 2017).

Fricción de fondo del modelo

Los términos de fricción en las ecuaciones (17) y (18) son particularmente significativas en las mediciones del run-up. Están dadas por:

$$f_1 = f * P * \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{h^2}} \quad (17)$$

$$f_2 = f * Q * \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{h^2}} \quad (18)$$

Dónde f es el coeficiente de fricción que se define como:

$$f = \frac{g * n^2}{h^{\frac{1}{3}}} \quad (19)$$

Siendo n el coeficiente de rugosidad de Manning.

4.3.2.2 CONDICIONES DE BORDE

Se consideran dos capas de mallas imaginarias en cada borde, y se utilizan para implementar las condiciones de contorno. Tres tipos de condiciones de contorno se implementan en Celeris: Onda sinusoidal, capa de esponja, y pared sólida completamente reflejante.

Pared Sólida

Las paredes sólidas son consideradas como un borde completamente reflejante, a fin de imponer estas condiciones, los valores en las mallas cercanas al borde son reflejados fuera del dominio. La duplicación garantiza que se cumplan las siguientes condiciones:

$$(P, Q) \cdot n = 0 \quad \nabla w \cdot n = 0 \quad (20)$$

Dónde n es el vector normal de la muralla sólida.

Físicamente lo anterior representa que los flujos de masa y las desnivelaciones en la muralla son cero (Tavakkol & Lynett, 2017).

Creador de olas sinusoidales.

Para generar olas sinusoidales con un periodo (T), amplitud (a), y dirección (θ) en el borde, los valores para η , P y Q son asignados de la siguiente manera:

$$\eta = a \sin(\omega t - k_x x - k_y y) \quad (21)$$

$$P = c \cos(\theta) \eta \quad (22)$$

$$Q = c \sin(\theta) \eta \quad (23)$$

Dónde:

$$c = \frac{\omega}{k} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad k_x = \cos(\theta) k \quad k_y = \sin(\theta) k \quad (24)$$

Donde k es el número de ola y se calcula usando la solución aproximada de Eckart para la relación de dispersión (Tavakkol & Lynett, 2017).

$$k = \frac{\omega^2}{g} \sqrt{\coth\left(\frac{\omega^2 d}{g}\right)} \quad (25)$$

Capa de esponja

Las capas de esponja en Celeris son implementadas, multiplicando los valores de η , P y Q por un coeficiente de amortiguamiento definido por:

$$\gamma(x, y) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\pi \frac{L_s - D(x, y)}{L_s}\right) \right) \quad (26)$$

Donde γ es el coeficiente de amortiguamiento, L_s es el ancho de la capa de esponja, y $D(x, y)$ es la distancia normal del borde absorbente. El coeficiente definido por la ecuación 26 sólo se aplica a las celdas que se encuentran dentro del área de la esponja (Tavakkol & Lynett, 2017).

4.3.2.3 IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA.

Para desarrollar la implementación numérica en Celeris se siguió lo realizado por Wei & Kirby (1995), con las ecuaciones 12, 13 y 14, las cuales pueden ser reordenadas como:

$$w_t = E(P, Q) \quad (27)$$

$$U_t^* = F(h, P, Q) + [F^*(Q)]_t \quad (28)$$

$$V_t^* = G(h, P, Q) + [G^*(P)]_t \quad (29)$$

Las cantidades recién introducidas se presentan en el anexo C.

Este reordenamiento nos permite reescribir las ecuaciones 12, 13 y 14 como una ecuación diferencial de segundo orden en el tiempo. Los términos del lado izquierdo en las ecuaciones 27 28 y 29 están discretizados en el tiempo. $[F^*(Q)]_t$ y $[G^*(P)]_t$ se evalúan por extrapolación en el tiempo, el resto de los términos en el lado derecho se conocen en el paso de tiempo actual. Se utilizó una discretización de diferencia finita MVF (Método de volumen finito) híbrido para resolver estas ecuaciones en cuadrículas cartesianas uniformes. El dominio espacial está discretizado por celdas rectangulares con dimensiones fijas de Δx y Δy . Cada celda desempeña el papel de un volumen de control para la discretización del MVF. Los centros de las celdas y sus valores promediados correspondientes se utilizan como puntos de cuadrícula en la diferencia finita. Los términos de la pendiente inferior se discretizan utilizando un esquema de positividad central-upwind bien equilibrado de segundo orden introducido por Kurganov & G., (2007). Este esquema a veces conocido como KP07, es un método de volumen finito para resolver el sistema Saint-Venant de ecuaciones de aguas poco profundas. El resto de los términos se discretizan utilizando el método de diferencia finita central (Tavakkol & Lynett, 2017).

KP07 garantiza la positividad de la profundidad del fluido calculada. Admite un estado seco sin necesidad de realizar un seguimiento del frente húmedo-seco y puede acomodar la topografía de fondo discontinua. Además, es particularmente adecuado para la implementación en la GPU. Se descubrió que este esquema es un método robusto y preciso, incluso con la implementación de precisión única de la GPU. El método es adecuado para el diseño interactivo de alto rendimiento de Celeris (Tavakkol & Lynett, 2017):

- Las variables desconocidas, $[w, P, Q]_t$ se reconstruyen (evalúan) linealmente en las interfaces de las celdas aplicando un limitador generalizado en sus derivados.
- Se aplica una corrección conservadora simple para preservar la positividad de h .

Las velocidades de flujo, u y v se calculan como sigue.

$$u = \frac{\sqrt{2h}(P)}{\sqrt{h^4 + \max(h^4, \epsilon)}} \quad (30)$$

$$v = \frac{\sqrt{2h}(Q)}{\sqrt{h^4 + \max(h^4, \epsilon)}} \quad (31)$$

Donde ϵ es una pequeña tolerancia predefinida para evitar la división por un número muy pequeño o cero.

- Los flujos se calculan en cada interfaz de celda empleando el esquema central avanzado.
- Los términos fuente son evaluados, y las variables desconocidas son encontradas para el siguiente paso de tiempo.

Para utilizar el método KP07 como el solucionador de MVF del esquema, en su último paso, se agregaron los términos dispersivos como términos fuente discretizados por el método de diferencia finita central.

La integración temporal se realiza mediante un esquema de Adams-Bashforth de tercer orden como paso predictivo, y un esquema de Adams-Moulton de cuarto orden opcional como paso de corrección (Durrant, 1990).

El detalle de la implementación numérica se incluye en el anexo B.

4.3.3 HARDWARE EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA.

Actualmente en la modelación numérica el dominio para realizar cálculos complejos los tiene los procesadores (CPU), debido a sus altas frecuencias y capacidad de procesamiento. Las frecuencias usualmente llegan a los 3.8 GHz, y la cantidad de núcleos que poseen son entre 4 a 8 en procesadores comunes, aunque actualmente pueden poseer entre 10 a 16 núcleos los procesadores desarrollados para servidores.

Para lograr optimizar el tiempo de cálculo se han desarrollado distintos tipos de algoritmos y lenguajes de programación que mejoren el desempeño de los procesadores, se han creado supercomputadores con una gran cantidad de núcleos para disminuir el tiempo al obtener resultados. Los procesadores al pasar el tiempo se hacen más eficientes, logrando un mejor desempeño, pero aumentando los costos asociados.

Sin embargo, a contar de hace unos años, el buscar métodos alternativos de procesamiento que optimizaran los cálculos, llevó a pensar en las tarjetas de video (GPU) como una opción. Este dispositivo posee una mayor cantidad de núcleos, pero a frecuencias más bajas, alcanzando los 1.8 GHz por núcleo comúnmente. Fue creado pensando en el cálculo paralelo de imágenes, que es lo que se encarga de interpolar los píxeles en la pantalla, este

trabajo lo hace de forma paralela en todos sus núcleos. Se pensó que, si este hardware fue creado para realizar cálculos paralelos de imágenes, también podía ser utilizado de otra manera, como procesador de cualquier tipo de cálculo que necesitara ser realizado de forma paralela.

Actualmente son muchos los modelos que son resueltos por medio de la GPU, optimizando el tiempo de cálculo a un menor costo.

Un punto a considerar respecto a Celeris, es que, a diferencia de los modelos convencionales, este resuelve los algoritmos por medio de la tarjeta gráfica (GPU), lo que se traduce en una alta velocidad de cálculo en comparación a SWASH.

5 **METODOLOGÍA**

En esta memoria se realizaron modelaciones de tres casos distintos para los modelos SWASH y Celeris, los cuales fueron.

- Modelación del experimento de Lynett et al. (2002), sección 5.1.
- Modelación utilizando una batimetría ideal a escala real, sección 5.2.
- Modelación del puerto de San Antonio, sección 5.3.

La primera modelación ideal fue realizada teniendo como guía el experimento desarrollado por Lynett, Wu, & Liu (2002). Se replicó exactamente el mismo experimento para ambos modelos, de esta forma se pudieron comparar los resultados obtenidos con un caso ya validado. Además, se utilizaron dos pendientes con mayor inclinación como extensión del experimento. Estas comparaciones fueron efectuadas en base al run-up y run-down, con el propósito de apreciar las diferencias entre ambos modelos en un caso ideal donde sólo el asomeramiento fuera de importancia.

El segundo experimento se realizó con una batimetría ideal a escala real con distintos períodos, esto fue pensado como una forma de comparar el coeficiente de asomeramiento en todo el dominio de la batimetría con ambos modelos.

Para el caso real se utilizó el sector del puerto de San Antonio en la región de Valparaíso. En este caso fue evaluado el comportamiento de los modelos en una batimetría compleja, donde se poseían los tres tipos de profundidades relativas, aguas profundas, intermedias y someras. En esta zona fueron realizadas las modelaciones para determinar qué modelo representaba con más semejanza la zona en cuestión. El nodo de análisis estuvo ubicado en el sitio 9 del puerto de San Antonio, lugar en donde se tuvieron los datos de oleaje de un mareógrafo.

El puerto de San Antonio posee muchas complicaciones, dentro de las cuales se encuentra su compleja batimetría debido al gran cañón que posee en las proximidades de la bocana de la dársena. Esta batimetría es sumamente irregular, al poseer los tres tipos de profundidades relativas los modelos tuvieron algunos problemas para lograr resolver este caso.

5.1 MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

La primera modelación siguió el experimento realizado por Lynett et al. (2002), el cual se basa en el experimento desarrollado por Madsen et al. (1997), por ello se replicó exactamente la misma batimetría de esos experimentos. Como comparación y teniendo como objetivo cuantificar cuál es la sensibilidad de ambos modelos al cambio en la pendiente del fondo, se crearon dos batimetrías más, con pendientes de 0.13 y 0.26.

Las características de la batimetría fueron.

- Profundidad del canal de 0.5 [m].
- Pendiente de 0.04
- Largo del canal 20 [m].
- Ancho del canal 10 [m].
- Como extensión del experimento también se utilizaron pendientes de 0.13 y 0.26.

En la Ilustración 7 se presenta una imagen de la batimetría ideal utilizada según Lynett et al. (2002)

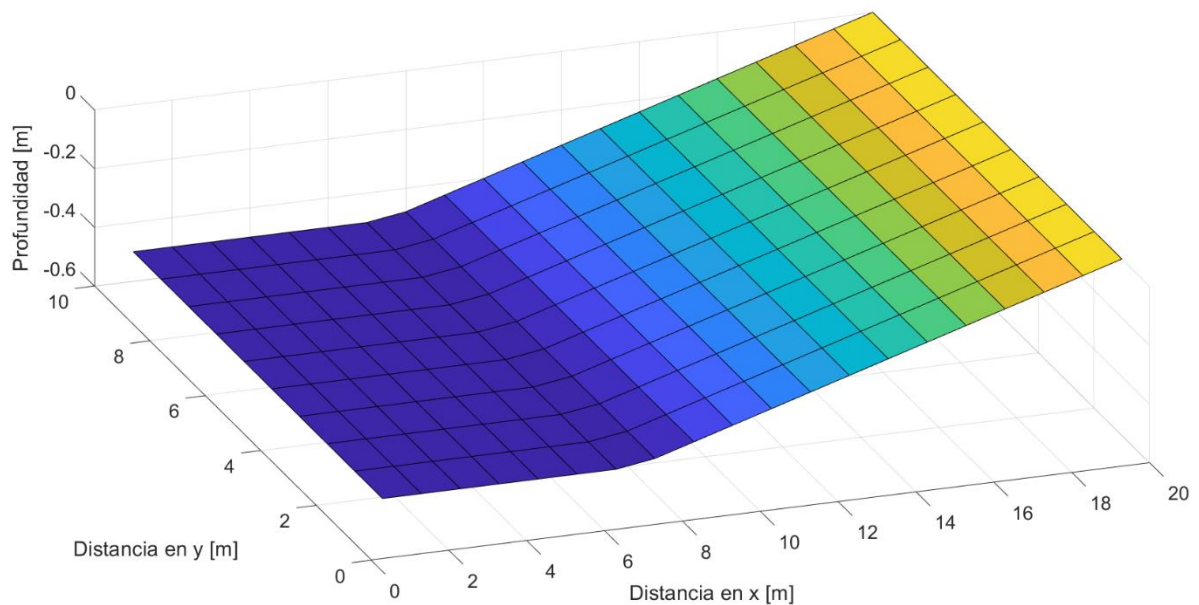


Ilustración 7: Batimetría ideal utilizada, pendiente 0.04

Fuente: Elaboración propia en base a Lynett et al. (2002)

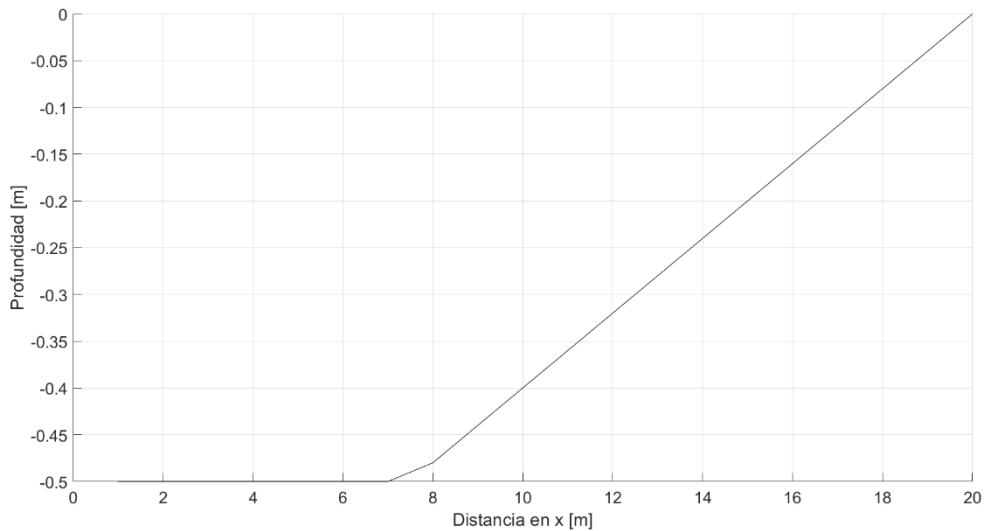


Ilustración 8: Vista en elevación batimetría ideal, pendiente 0.04

Fuente: Elaboración propia en base a Lynett et al. (2002)

En esta modelación se realizaron propagaciones tanto con oleaje regular como irregular, replicando el experimento desarrollado por Lynett et al. (2002).

Se utilizaron las siguientes condiciones de oleaje:

- Un tren de olas con altura de 0.006 [m] (oleaje regular).
- Periodo de 10 [s].
- Oleaje incidente con dirección Oeste.
- Un tamaño de malla de 0.045 [m].
- Un paso de tiempo 0.01 [s].
- Sin fricción de fondo.

Para el oleaje irregular se generó un espectro sintético JONSWAP siguiendo el método propuesto por Liu & Frigaard (2001), considerando como base los siguientes parámetros.

- Altura significativa 0.006 [m].
- Periodo peak 10 [s].
- Frecuencia peak 0.1 [Hz].
- Frecuencia inicial 0.06 [Hz].
- Frecuencia final 0.3 [Hz].
- Ancho de banda de frecuencia 0.0024 [Hz].
- Oleaje incidente con dirección Oeste.
- Cantidad de olas 100.
- Coeficiente de apuntalamiento 3.3.

Con estos datos se obtuvo la densidad espectral, la amplitud asociada a esa densidad, el ancho de banda de las frecuencias y las desnivelaciones representativas de ese espectro.

Estos datos se ingresaron a ambos modelos, generando el oleaje irregular con el que se realizó la modelación.

5.2 MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL, COEFICIENTES DE AGITACIÓN (ASOMERAMIENTO)

Se realizó una segunda batimetría ideal, en esta ocasión se construyó con el fin de encontrar los coeficientes de agitación (sólo asomeramiento en este caso) para todo el dominio con ambos modelos.

Las características de la batimetría fueron.

- Profundidad de 17 [m] desde el punto 0 hasta los 100 [m].
- Pendiente de 0.2 (20%) a partir de los 100 [m] hasta los 200 [m].
- Largo del canal 200 [m].
- Ancho del canal 50 [m].

En la Ilustración 9 se presenta una imagen de la batimetría ideal a escala real con pendiente de 20% que fue utilizada.

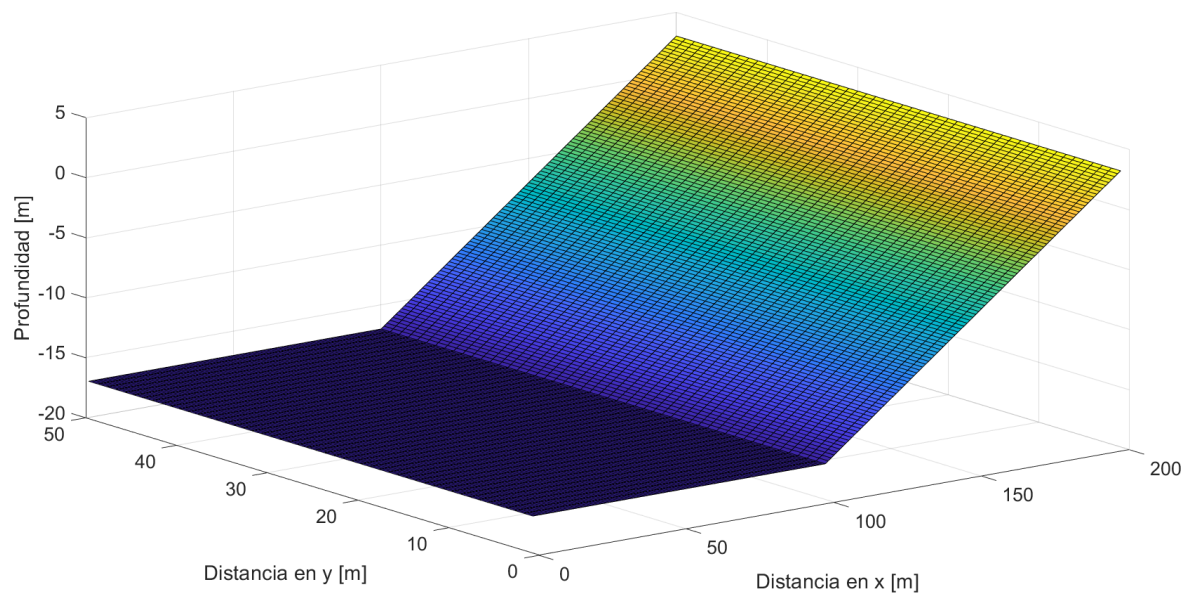


Ilustración 9: Batimetría ideal con pendiente del 20%

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de oleaje utilizadas para la modelación, se realizaron por medio de espectros sintéticos direccionales. Las características de dichos espectros fueron.

- Altura significativa 1 [m].
- Periodos peak desde 6 hasta 17 [s].
- Frecuencia inicial 0.083 [Hz].
- Frecuencia final 0.25 [Hz].
- Oleaje incidente con dirección Oeste.
- Cantidad de olas 100.
- Coeficiente de apuntalamiento 3.3.

Utilizando un caso tan simplificado con una altura unitaria, se buscó encontrar los coeficientes de agitación de ambos modelos para toda la batimetría cada 1 metro de distancia.

5.3 MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

La batimetría real fue obtenida por medio de las cartas náuticas digitales del SHOA, y corregidas por medio de un plano del puerto de San Antonio proporcionado por la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA).

Los datos de oleaje propagados desde aguas profundas hasta el nodo donde se encuentra ubicado el ADCP fueron proporcionados por la Universidad de Valparaíso (Laboratorio de hidráulica, Cesar Esparza). Esta información histórica proporcionada por la Universidad de Valparaíso, corresponde a datos de oleaje propagados que contemplan desde el año 1990 hasta el 2018.

Los datos in situ del ADCP fueron proporcionados por la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA).

Los registros del sitio 9 donde se realizó la comparación fueron proporcionados por EPSA.

La modelación con SWASH fue realizada en el súper computador Leftraru de la Universidad de Chile.

La modelación con Celeris fue hecha en un computador común con una tarjeta gráfica NVIDIA GTX 1050.

5.3.1 BATIMETRÍA REAL Y DOMINIO DE CÁLCULO

La batimetría del puerto de San Antonio fue procesada por medio del software Global Mapper y Mike Zero Bathymetries. En la Ilustración 10 se presenta la imagen del puerto de San Antonio, donde lo encerrado dentro del rectángulo rojo corresponde al dominio de la malla de cálculo; la batimetría utilizada ya interpolada y filtrada se muestra en la Ilustración 11.

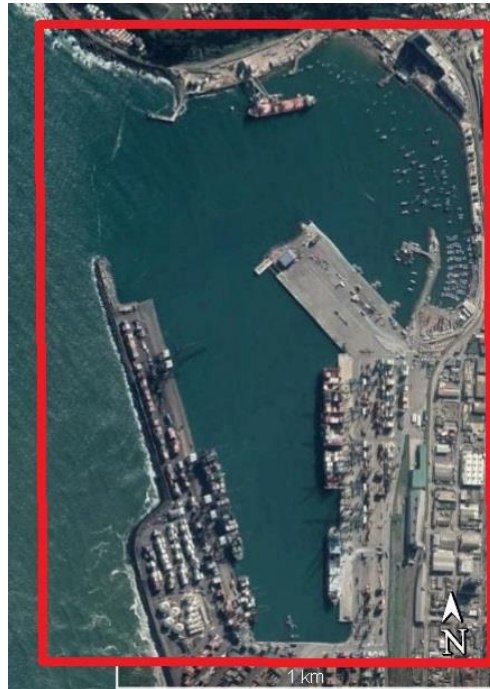


Ilustración 10: Dominio de cálculo

Fuente: Google Earth

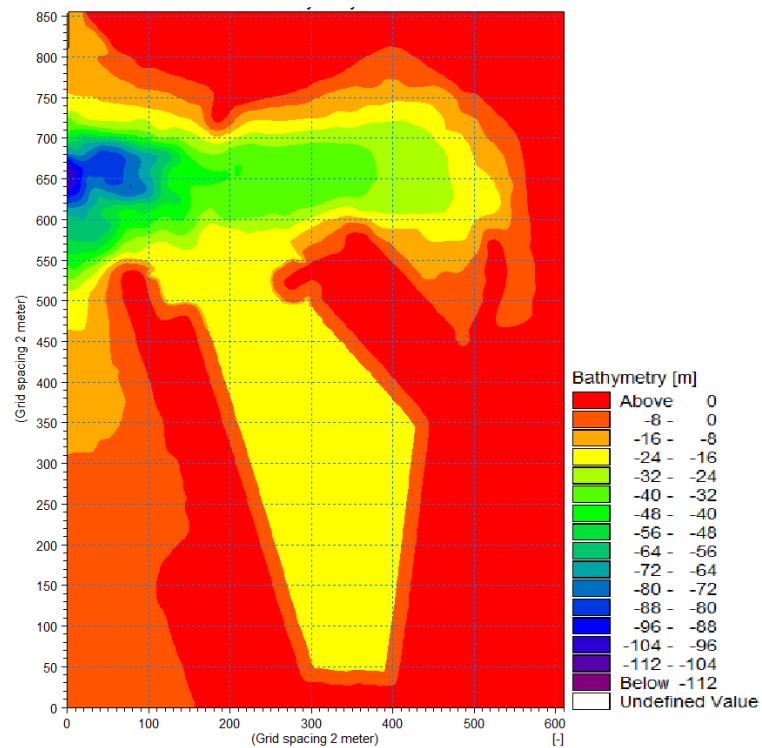


Ilustración 11: Batimetría final utilizada

Fuente: Elaboración propia

Se generó una batimetría con una resolución de 2 [m]; lo suficientemente pequeña para resolver todos los procesos costeros que se generan de la forma más certera posible. La resolución de la batimetría está estrictamente ligada con las dimensiones de la malla de cálculo de los modelos.

Se utilizó una malla de cálculo con las mismas dimensiones que la malla batimétrica, con inicio en la coordenada UTM 19 H 256326 E, 6279600 S hasta el punto UTM 19 H 257548 E, 6281312 S. La cantidad de nodos fueron de 611 en el eje x y 856 en el eje y , las dimensiones de la malla fueron de 1222 [m] en x y 1712 [m] en y .

5.3.2 ANÁLISIS DE CLIMA MEDIO

Para esta modelación se utilizaron los datos otorgados por la Universidad de Valparaíso entre los años 1990 a 2018 y los datos proporcionados por EPSA desde 2015 al 2018. Ambos conjuntos de datos fueron obtenidos en el nodo en donde se encuentra el ADCP de EPSA, en las coordenadas UTM 19 H 256326 E, 6280502 S.



Ilustración 12: Ubicación ADCP

Fuente: <https://vcmov.epsa.cl/about-us>

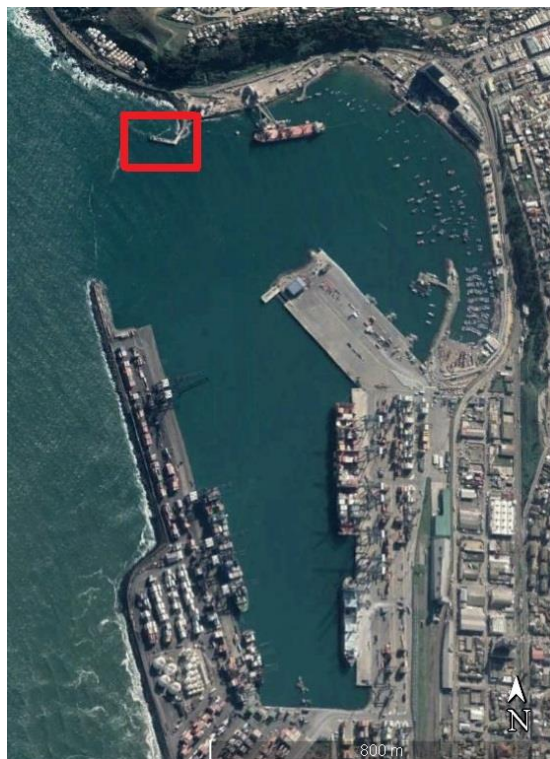


Ilustración 13: Ubicación sitio 9

Fuente: Google Earth

Con el fin de analizar el clima reinante, se realizaron análisis de clima medio para los datos del ADCP y de la Universidad de Valparaíso en el nodo presentado en la Ilustración 12, y para los datos del sitio 9 en el nodo mostrado en la Ilustración 13. Este análisis se desarrolló por medio de tablas de incidencia, histogramas y rosas de oleaje, para determinar con qué alturas, periodos y direcciones se generarían los espectros sintéticos para ingresar a los modelos.

Los histogramas, tablas y rosas se presentan en el anexo D.

5.3.3 CALIBRACIÓN DE LOS DATOS DE CONDICIÓN DE BORDE

Para realizar la modelación y validar los modelos fue necesario contar con datos de un período equivalente, es decir que los datos que se vayan a ingresar a los modelos correspondieran con los que se tienen en el sitio donde se quieren validar.

Como se mencionó anteriormente, los datos del ADCP en la bocana del puerto fueron desde el año 2015 hasta el 2018, mientras que los datos propagados fueron desde 1990 hasta el 2018, por lo que existieron años donde coincidieron los periodos de tiempo. Otro factor a considerar fue que los registros del sitio 9 del puerto fueron sólo de 2 meses, junio y Julio del 2010, por lo que se tuvo una pequeña ventana de tiempo en la cual el intervalo de años

fue el mismo (2015 a 2018), y sólo unos meses con los cuales se pudo realizar una validación que fueron junio y julio de 2010.

Se calibraron los datos de las propagaciones entregadas por el laboratorio de hidráulica de la universidad respecto a los del ADCP en esas ventanas de tiempo. El ajuste realizado fue por medio de percentiles y mínimos cuadrados, el cual fue discretizado de acuerdo a las direcciones de incidencia del oleaje.

En las tablas de incidencia de altura significativa/Dirección media que se encuentran en el anexo D sección datos propagados, se muestra que sólo existieron 2 direcciones en toda la extensión de la data, los cuales fueron W y WNW, por razones de simplificación y continuidad es que de igual manera sólo se consideraron estas direcciones para obtener el ajuste de los parámetros altura significativa y período peak.

En las ilustraciones Ilustración 14 a Ilustración 17, se muestran las rosas de dispersión para cada grupo de datos en ambas direcciones de incidencia. Estas rosas muestran valores de período peak/dirección media.

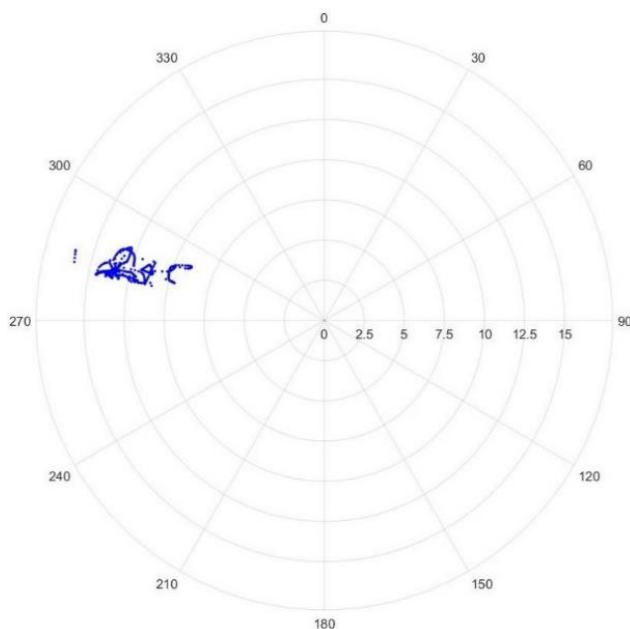


Ilustración 14: Rosa de dispersión Tp/Dir datos UV Junio-Julio 2015-2018 WNW

Fuente: Elaboración propia

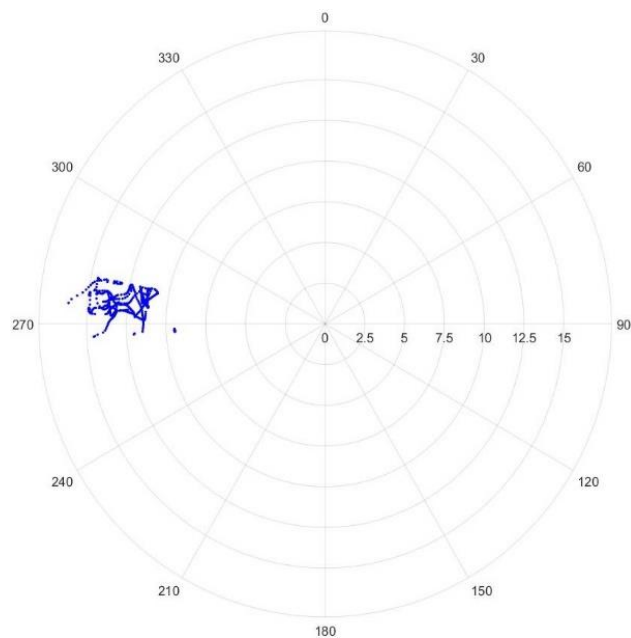


Ilustración 15: Rosa de dispersión Tp/Dir datos UV Junio-Julio 2015-2018 W

Fuente: Elaboración propia

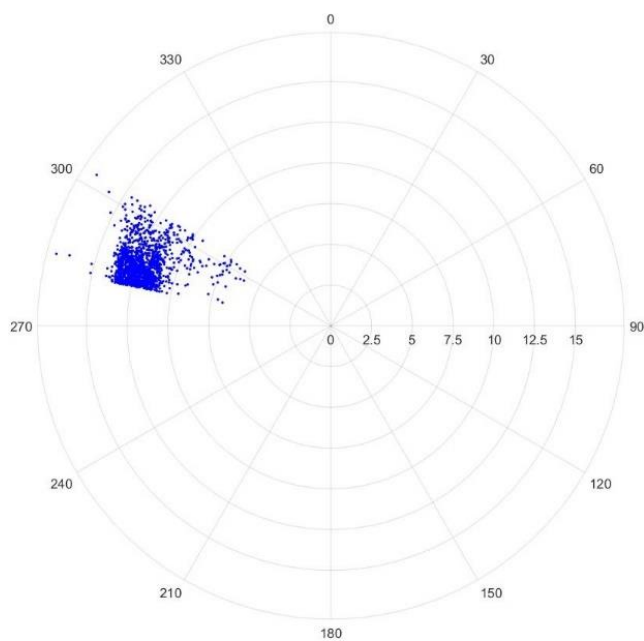


Ilustración 16: Rosa de dispersión Tp/Dir ADCP junio-julio 2015-2018 WNW

Fuente: Elaboración propia

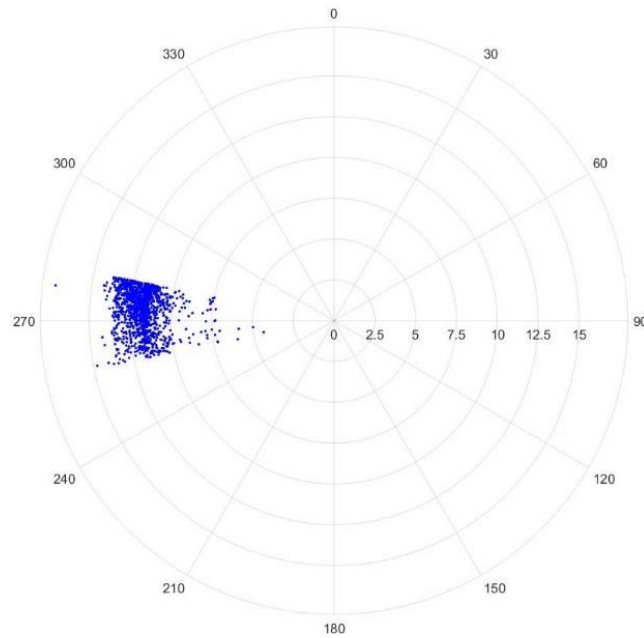


Ilustración 17: Rosa de dispersión Tp/Dir ADCP junio-julio 2015-2018 W

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Ilustración 14 a Ilustración 17, los períodos de los datos propagados se encontraron mucho más agrupados, mientras que los del ADCP estuvieron mucho más dispersos en distintos valores de períodos.

Finalmente utilizando ambos grupos de datos se generó un gráfico de ajuste por mínimos cuadrados para cada dirección.

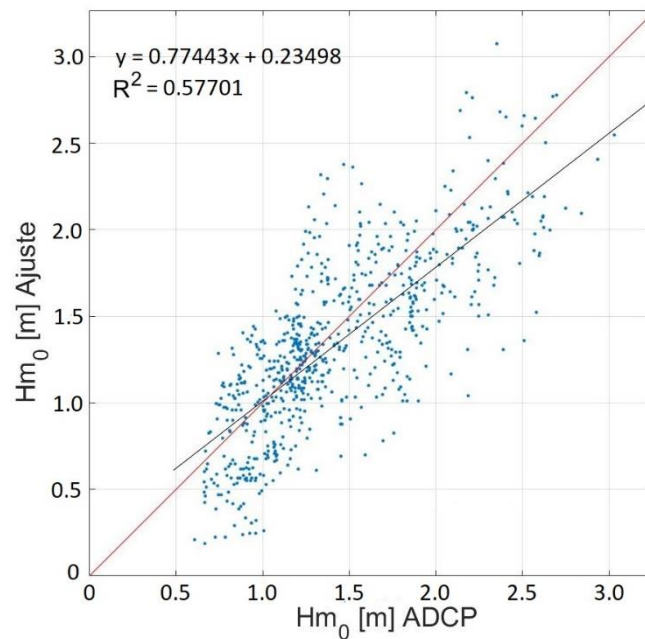


Ilustración 18: Ajuste por mínimos cuadrados junio-julio 2015-2018 WNW

Fuente: Elaboración propia

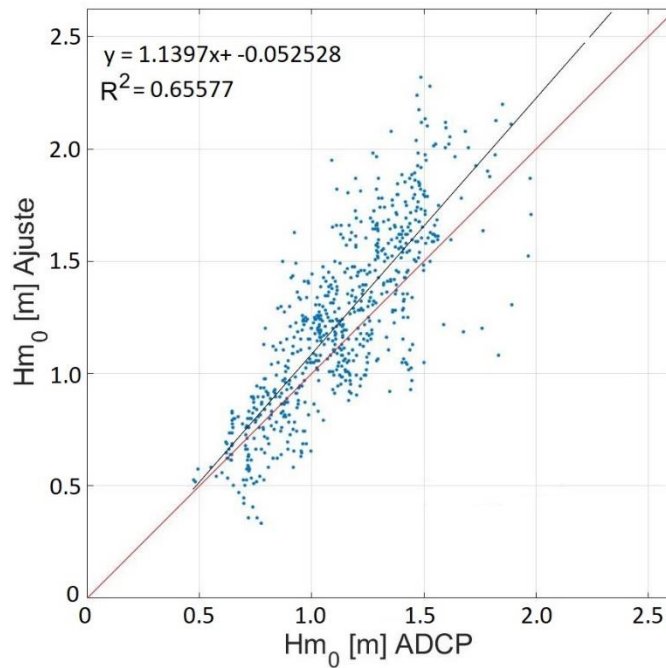


Ilustración 19: Ajuste por mínimos cuadrados junio-julio 2015-2018 W

Fuente: Elaboración propia

Tras realizar los ajustes, se concluyó que se adecuaron de mejor manera los datos provenientes del W (Ilustración 19), con una pendiente de 1.1397 y con un coeficiente R^2 de 0.655, mientras que los provenientes del WNW (Ilustración 18) se ajustaron con una pendiente de 0.7744 y un coeficiente R^2 de 0.577. Se considera un buen ajuste de los datos mientras más cercano esté la pendiente y el coeficiente R^2 a 1 (línea roja).

Una vez ajustadas las alturas y períodos se elaboraron tablas de incidencia, con estas fue posible tener una visión de la distribución de los datos en intervalos.

Tp [s]	Hm0 [m]				Total	F. relativa	F. acumulada
	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5			
9-11	15	11			26	3.03%	100.00%
11-13	51	113	80	20	264	30.77%	96.97%
13-15	74	153	46	17	290	33.80%	66.20%
15-17	79	128	32	15	254	29.60%	32.40%
17-19	7	16	1		24	2.80%	2.80%
Total	226	421	159	52	858		
F. relativa	26.34%	49.07%	18.53%	6.06%			
F. acumulada	100.00%	73.66%	24.59%	6.06%			

Tabla 1: Tabla de incidencia datos ajustados W

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la Tabla 1 las alturas más frecuentes se encontraron entre los 0.5 [m] a 1.5 [m], las que correspondieron a una frecuencia de ocurrencia del 75.41%. Los períodos se encontraron entre los 11 [s] a 17 [s], que representaron el 94.17% de los datos para la dirección W.

Tp [s]	Hm0 [m]							Total	F. relativa	F. acumulada
	<0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5			
8-10			27	42				69	11.39%	100.00%
10-12	10	17	9	44	15		9	104	17.16%	88.61%
12-14	7	45	44	43	3	17	5	164	27.06%	71.45%
14-16	5	26	115	42	2	2	1	193	31.85%	44.39%
16-18			17	30	10	1		58	9.57%	12.54%
18-20					6	1		7	1.16%	2.97%
20-22						11		11	1.82%	1.82%
Total	22	88	212	201	36	32	15	606		
F. relativa	3.63%	14.52%	34.98%	33.17%	5.94%	5.28%	2.48%			
F. acumulada	100.00%	96.37%	81.85%	46.86%	13.70%	7.76%	2.48%			

Tabla 2: Tabla de incidencia datos ajustados WNW

Fuente: Elaboración propia

Para la dirección WNW según la Tabla 2, las alturas frecuentes fueron desde los 0.5 [m] a los 2 [m], lo que correspondió a un total de 82.67% de las olas, es de importancia mencionar que existieron alturas máximas entre los 3 [m] a los 3.5 [m], con una frecuencia de 2.48% de ocurrencia. Respecto a los períodos, la mayor frecuencia de estos se encontró entre los 10 [s] a los 16 [s] que correspondió a un total de 76.07%.

5.3.4 SELECCIÓN DE CLIMAS DE OLEAJE

Para realizar la modelación se utilizaron sólo las condiciones de oleaje que se ajustaron a partir de los datos de las propagaciones, que correspondieron a las direcciones W y WNW, con las que se crearon espectros sintéticos direccionales. Estos espectros tuvieron solamente la dirección principal de propagación respectiva, por lo que su spreading direccional fue 0°. Los espectros se utilizaron como condición de borde inicial en la región oeste de la malla de cálculo para generar el oleaje irregular que fue propagado.

En la Ilustración 20 e Ilustración 21, se muestran un espectro sintético direccional junto con sus desnivelaciones asociadas.

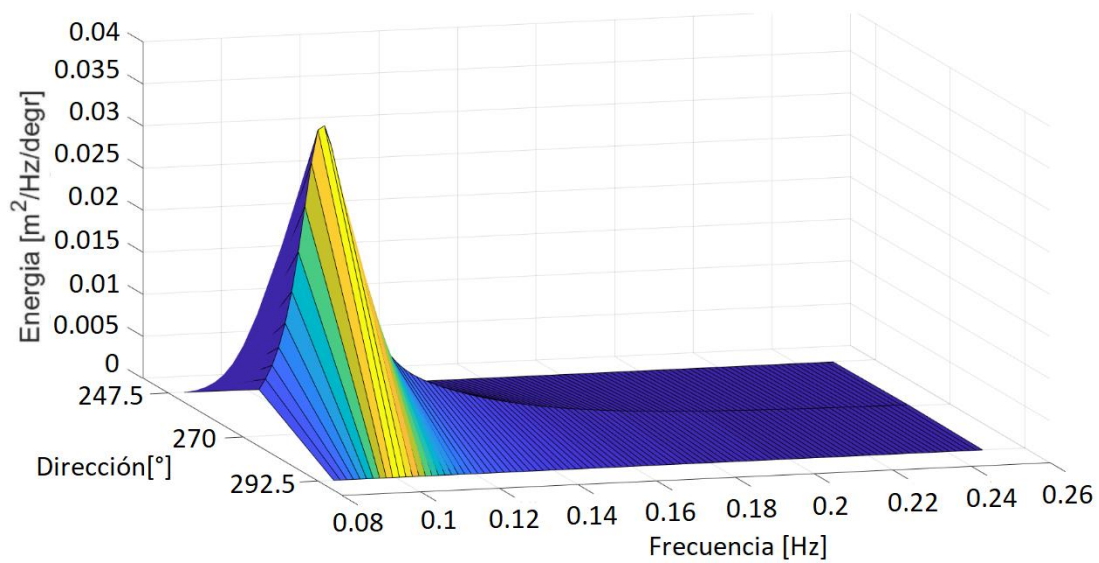


Ilustración 20: Espectro direccional sintético JONSWAP

Fuente: Elaboración propia

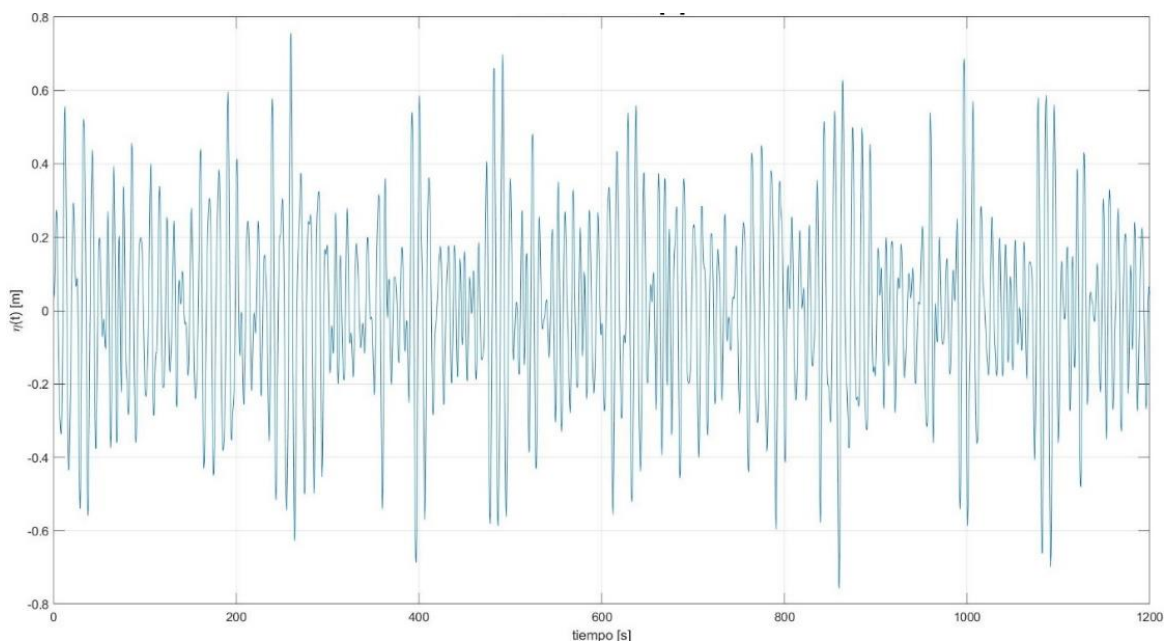


Ilustración 21: Desnivelaciones asociadas al espectro JONSWAP

Fuente: Elaboración propia

Este espectro en particular se generó en base de una altura significativa de 1 [m], período peak 10 [s], período medio máximo de 12 [s], período medio mínimo de 4 [s], 100 olas, coeficiente de apuntalamiento y 3.3, tiempo de registro de 0.5 [s] y 20 min de duración.

5.3.5 OBTENCIÓN DE LOS DATOS

Se utilizaron tres nodos de registro, uno en el sitio 9 coordenadas UTM 19 H 256616 E, 6281002 S, otro en el medio de la dársena coordenadas UTM 19 H 257003 E, 6280200 S, y por último un nodo en las coordenadas UTM 19 H 257184 E, 6280681 S.

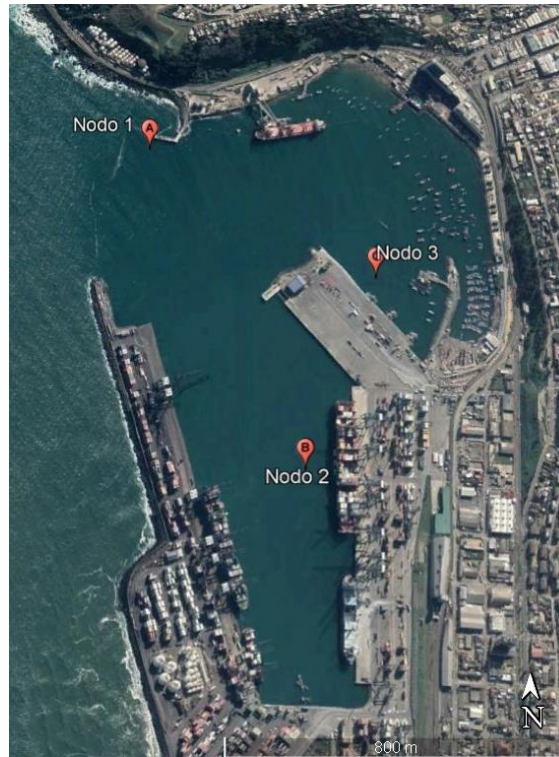


Ilustración 22: Ubicación nodos de registro

Fuente: Google Earth.

En estos nodos se registraron desnivelaciones durante 20 minutos, de las cuales por medio de un script en MatLab que utiliza la transformada rápida de Fourier, se obtuvieron la densidad espectral y parámetros espectrales, los cuales corresponden a alturas significativas espectrales, alturas significativas (1/3), períodos peak y dirección peak asociada al periodo peak.

6 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de tres modelaciones: dos casos ideales y un caso real. En cada una de ellas se ingresó un oleaje regular e irregular; de esta forma se comparó la sensibilidad que presenta cada modelo a distintas condiciones de oleaje.

6.1 MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

Para la primera modelación ideal se utilizó, como se había mencionado en la sección 5.1, el experimento realizado por Lynett et al. (2002). El resultado de esta modelación fue contrapuesto con los resultados obtenidos al variar exclusivamente la pendiente del fondo.

En este apartado se muestran los resultados tanto como para el experimento cuya pendiente es de 0.04 (4%), como para las otras pendientes de 0.13 (13%) y 0.26 (26%).

6.1.1 REPRODUCCIÓN DEL EXPERIMENTO DE LYNETT ET AL. (2002)

Con las especificaciones mencionadas en el capítulo 5.1, se realizó la comparación entre ambos modelos y el experimento de Lynett et al. (2002).

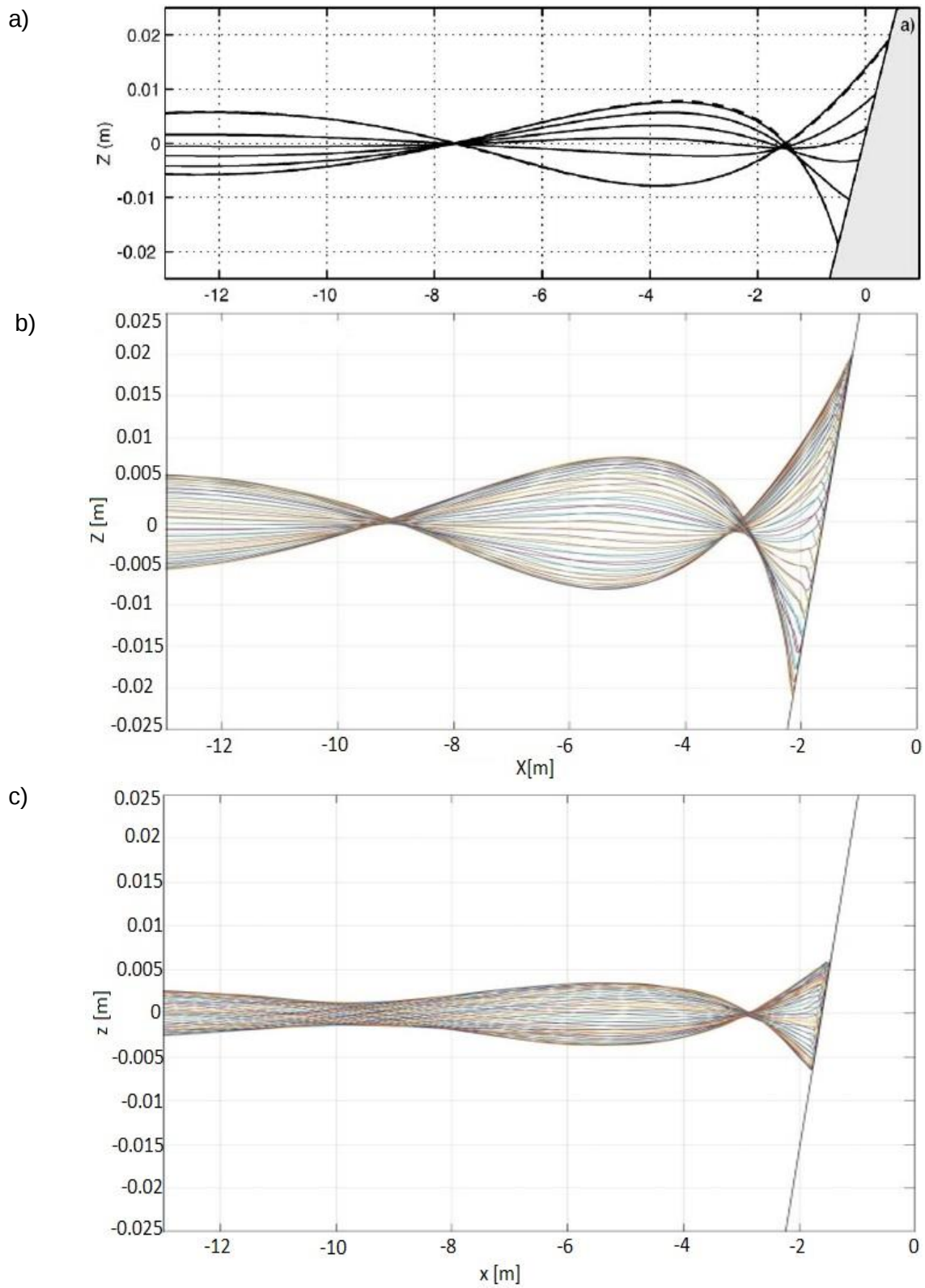
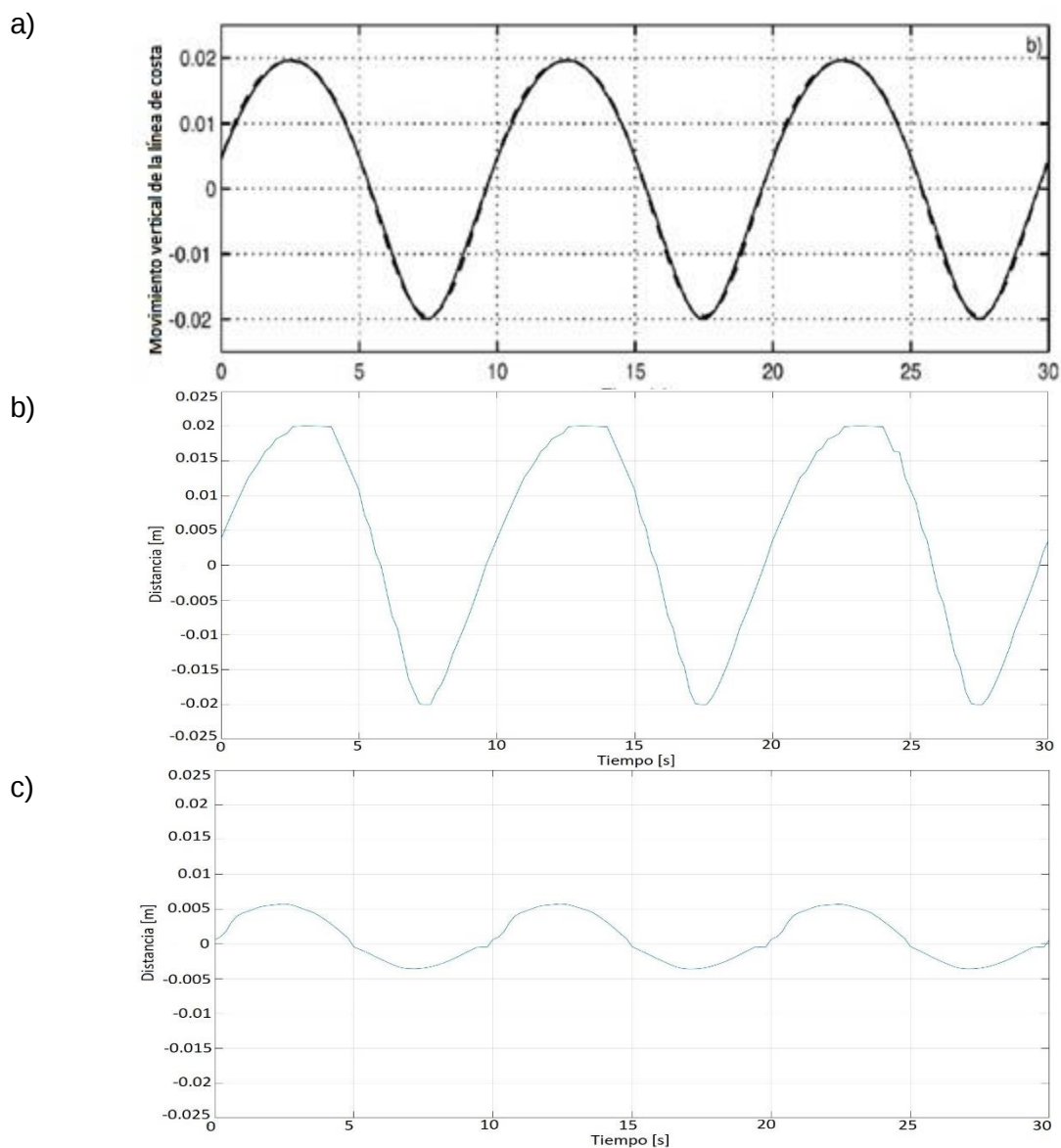


Ilustración 23: Desnivelaciones calculadas por: a) Lynett et al. (2002), b) SWASH y c) Celeris para diferentes instantes de tiempo. Fuente: a) Lynett et al. (2002), b) y c) Elaboración propia.

En la Ilustración 23 se muestran las desnivelaciones en distintos instantes de tiempo para cada uno de los casos. En la Ilustración 23a se presenta el gráfico obtenido del experimento realizado por Lynett et al. (2002), en donde se muestran las desnivelaciones y las distancias de run-up y run-down registradas. En la Ilustración 23b se exponen las desnivelaciones y distancias de run-up y run-down obtenidas por el modelo SWASH, en donde se aprecia que coinciden exactamente con las de la Ilustración 23a. No se contó con los datos reales del experimento para haber realizado una comparación cuantitativa, sólo fue posible obtener una comparación gráfica. En la Ilustración 23c se exhiben las desnivelaciones y distancias de run-up y run-down adquiridas con el modelo Celeris, en donde es posible contemplar que no se asemeja en nada a los casos anteriores.

En la Ilustración 24 se presentan los movimientos de la costa del experimento de Lynett et al. (2002) y las modelaciones realizadas con SWASH y Celeris respectivamente.



Como se observó en la Ilustración 23 e Ilustración 24, SWASH fue capaz de resolver el problema obteniendo resultados similares a los del experimento de Lynett et al. (2002). Celeris por su parte no fue capaz de reproducir los resultados del experimento. Esto debido tanto a las ecuaciones de Boussinesq como al esquema numérico utilizado por el modelo. Con esta comparación fue notoria la diferencia entre ambos modelos para el mismo problema con las mismas condiciones iniciales.

Al comparar la Ilustración 23a con la Ilustración 23b e Ilustración 24a con la Ilustración 24b, se contempló que fueron muy parecidos gráficamente, mientras que los valores máximos y mínimos fueron los mismos en ambos casos. No se tuvieron los datos del experimento de Lynett et al. (2002) para poder hacer una comparación cuantitativa, sólo fue posible compararlos gráficamente.

Para lograr que Celeris obtuviera las mismas desnivelaciones máximas que SWASH se debió utilizar una altura inicial de 0.02 [m], con la cual fue posible obtener el run-up máximo de 0.02 [m] del experimento.

Como se observa en la Ilustración 25, el run-up y run-down fue semejante al del experimento con un 1% de error. Sin embargo, las desnivelaciones fueron completamente diferentes en el resto del canal, con un error máximo del 60% y un error mínimo del 33.33%. En la Ilustración 26, se muestran los desplazamientos de la costa en el intervalo $-2 \leq x < -1$, donde se observa que los desplazamientos no correspondieron al experimento y sólo concuerdan en los valores máximos y mínimos.

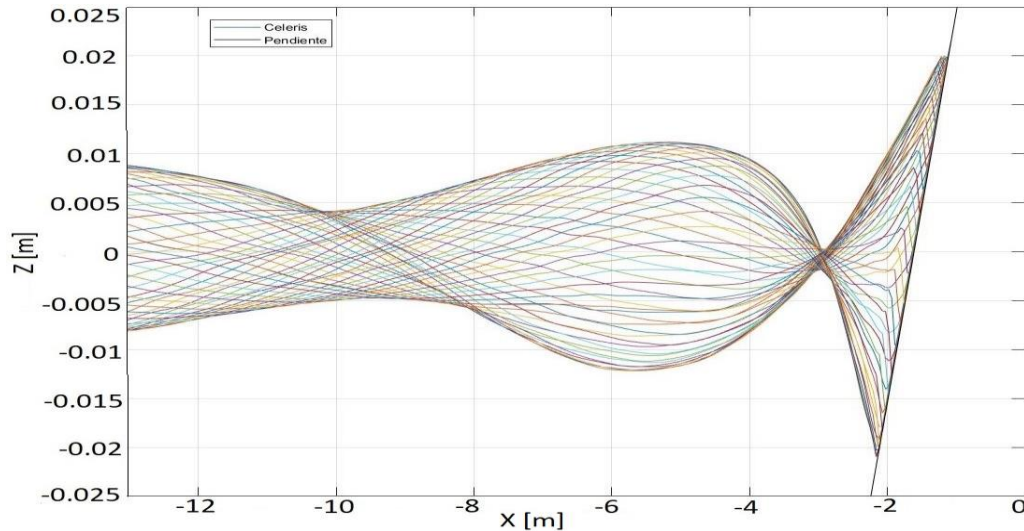


Ilustración 25: Desnivelaciones y run-up del modelo Celeris con altura inicial 0.02 [m] con pendiente 0.04.

Fuente: Elaboración propia.

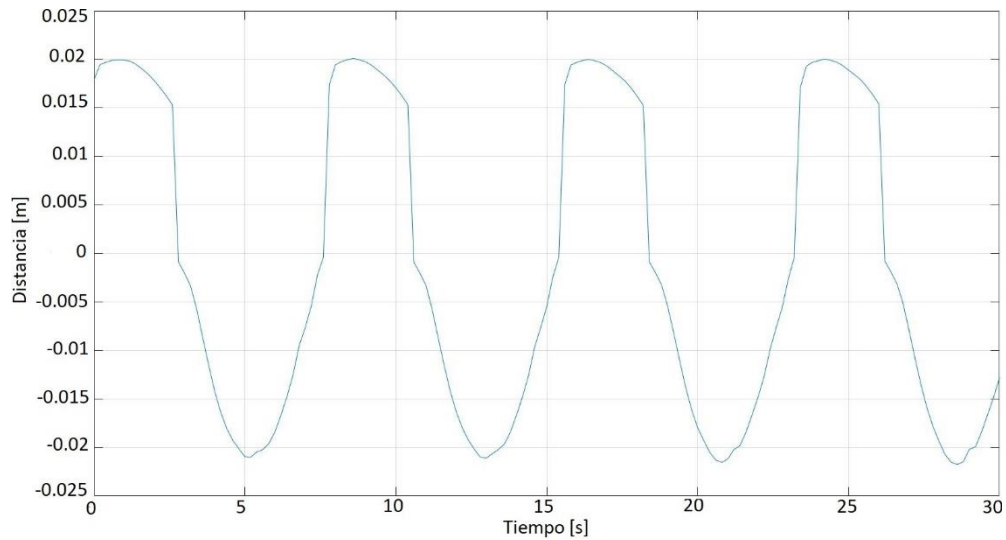


Ilustración 26: Movimiento de la línea de costa modelo Celeris con altura inicial 0.02 [m].

Fuente: Elaboración propia.

Comparación del run-up y run-down.

En la Ilustración 27 se presentan el run-up máximo y run-down mínimo alcanzado por ambos modelos. El run-up máximo para SWASH (línea roja) fue de 0.02, y para Celeris (línea azul) fue de 0.0074, lo que corresponde a una variación del 63%. El run-down mínimo fue de -0.02 para SWASH y -0.0055 para Celeris, que significa una variación del 72.5%.

Como forma de visualizar de mejor manera lo expuesto en la Ilustración 23, Ilustración 24 e Ilustración 27, se presentan de forma más clara el run-up máximo y el run-down mínimo entre ambos modelos.

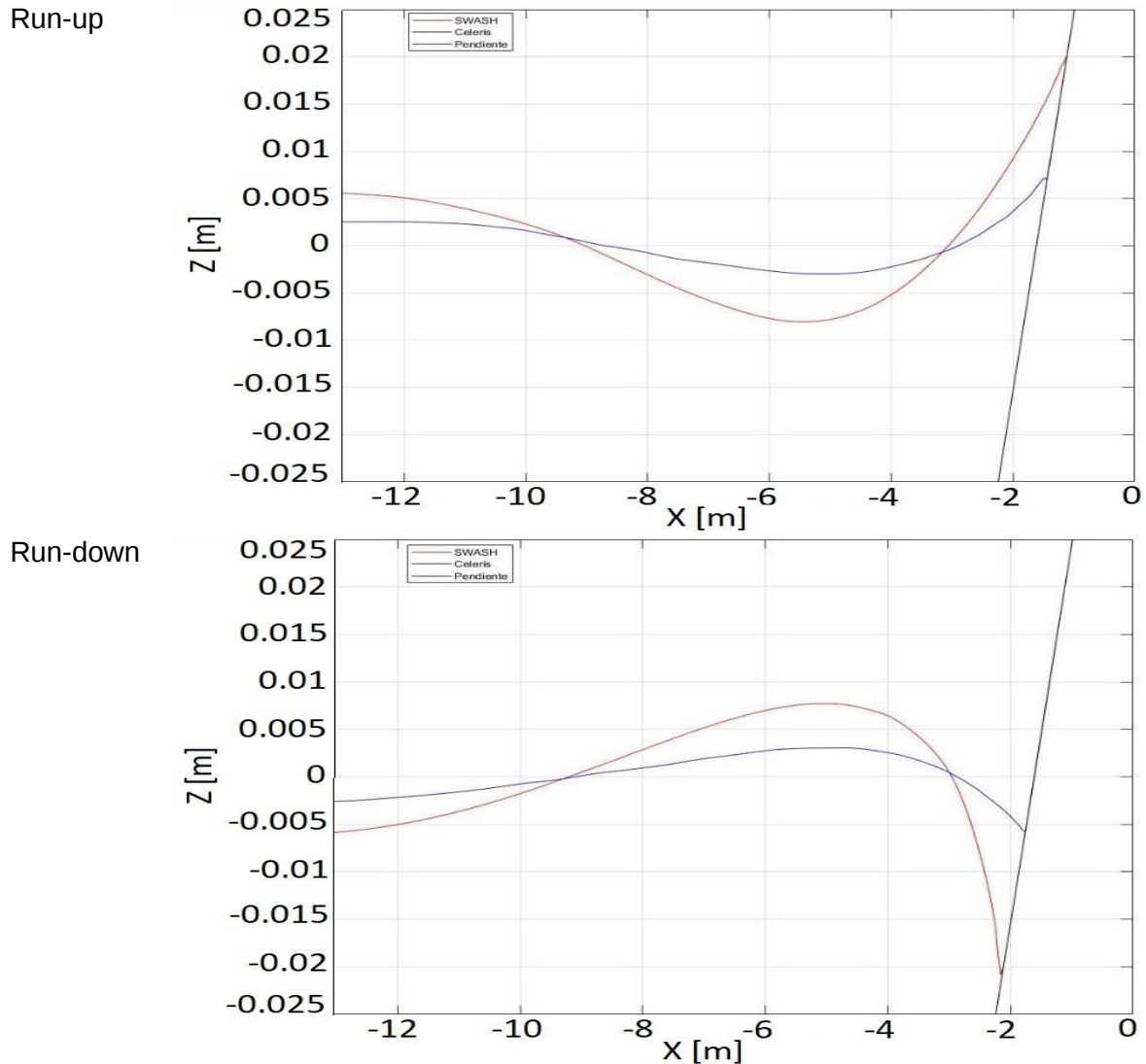


Ilustración 27: Run-up y run-down para una pendiente de 0.04, ambos modelos.

Fuente: Elaboración propia.

6.1.2 EXTENSIÓN DEL EXPERIMENTO DE LYNETT ET AL. (2002) A OTRAS PENDIENTES (0.13 y 0.26)

Para comparar las diferencias entre ambos modelos se realizó un análisis de sensibilidad variando únicamente la pendiente del fondo, utilizando pendientes de 0.13 y 0.26. Se mantuvieron todos los demás parámetros constantes según lo descrito en la sección 5.1.

Pendiente 0.13

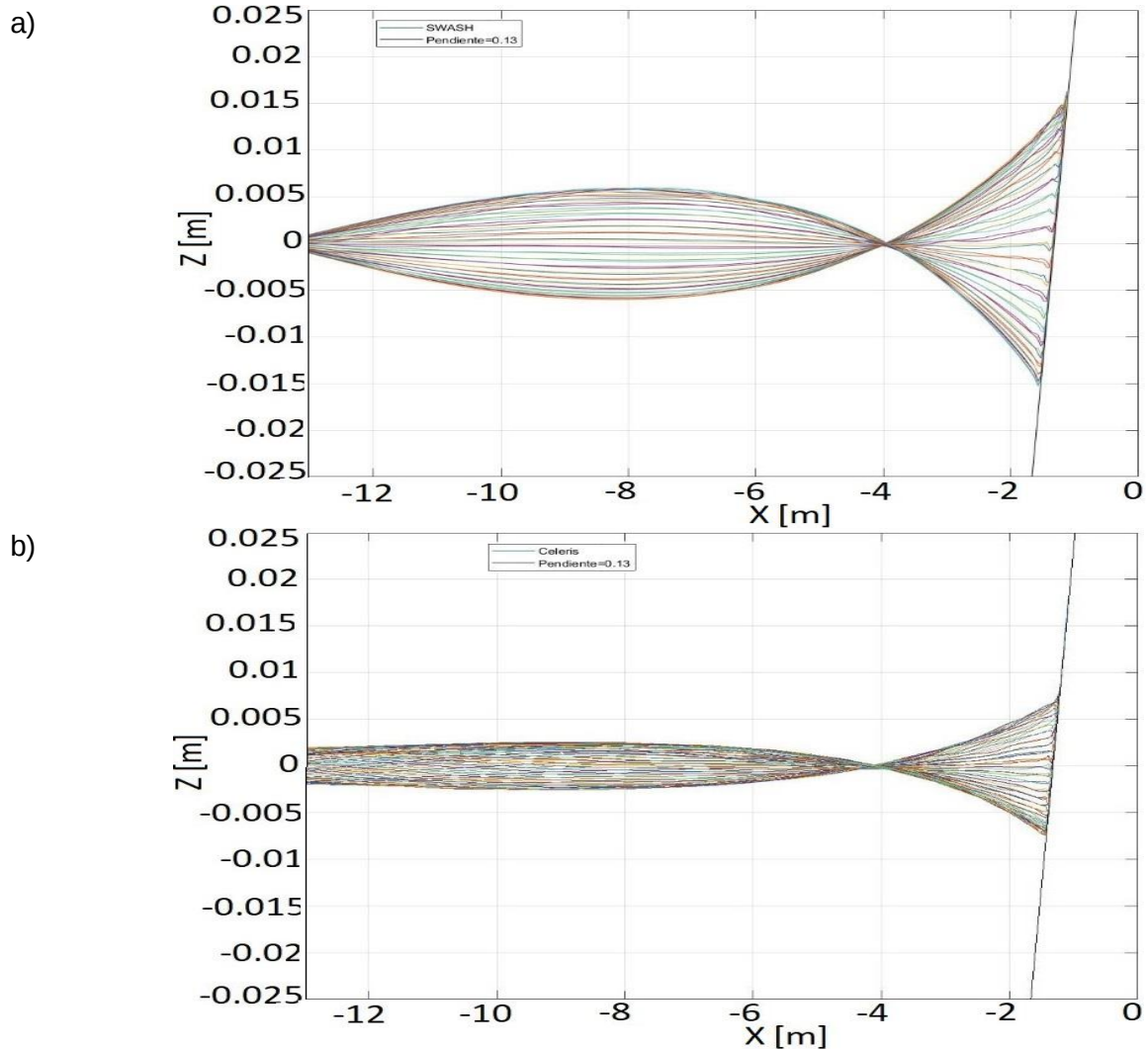


Ilustración 28: Desnivelaciones con una pendiente de 0.13, por: a) SWASH y b) Celeris.

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 28a corresponde al modelo SWASH. Se observó que al aumentar la pendiente se redujo el run-up y run-down, disminuyendo de 0.02 [m] a 0.016 [m] y de -0.02 [m] a -0.015 [m], lo que significó una disminución del 25% para ambos casos.

Con el modelo Celeris en la Ilustración 28b, la distancia no varió en gran medida en comparación al experimento mostrado en la Ilustración 23c, sin embargo, se apreció que hubo un pequeño aumento del run-up y run-down, con valores de 0.006 y -0.0065, lo que equivale a una diferencia del 18.9% y 15.38% respecto al experimento con pendiente 0.04 con el mismo modelo, por lo que Celeris no fue muy sensible al cambio de pendiente.

Pendiente 0.26

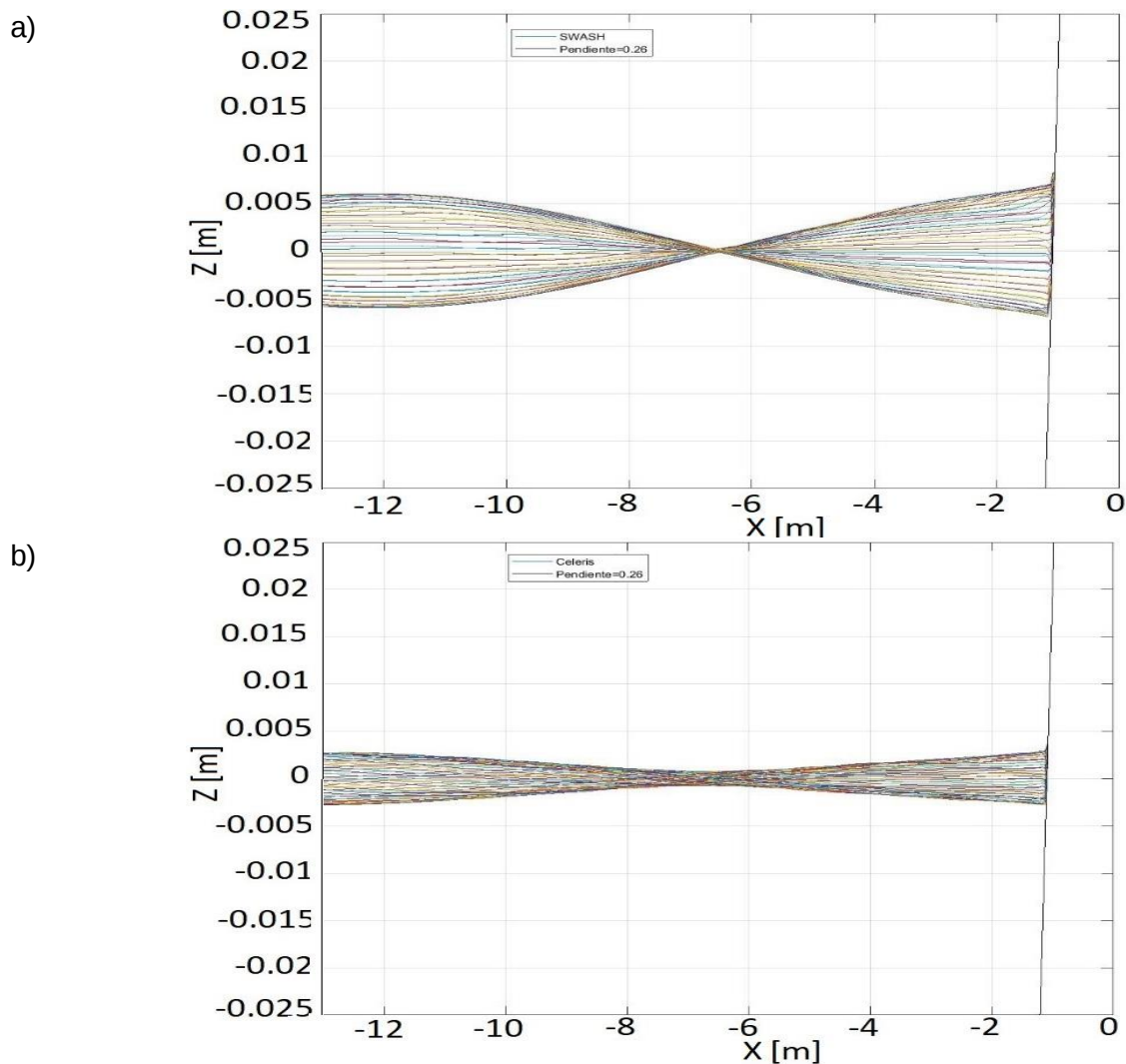


Ilustración 29: Desnivelaciones con una pendiente de 0.26, por: a) SWASH y b) Celeris.

Fuente: Elaboración propia

Para profundizar en cómo los modelos reaccionan al cambio de la pendiente, se utilizó la mayor pendiente posible en la cual los modelos fueron estables. En este caso la Ilustración 29a corresponde al modelo SWASH y la Ilustración 29b a Celeris.

Para SWASH, el run-up tuvo un valor máximo de 0.008 y el run-down un valor mínimo de -0.006, lo que comparado con el experimento original fueron variaciones del 60% y 70% respectivamente.

En cuanto a Celeris, se obtuvieron valores de run-up y run-down de 0.0025 y -0.0025, lo que equivale a una variación del 66.2% respecto a la pendiente de 0.04.

Comparación de run-up y run-down entre los modelos

Para tener una mejor estimación de las diferencias entre cada modelo en cuanto al run-up y run-down, se realizó una comparación para cada pendiente. La línea roja corresponde a SWASH y la azul a Celeris.

Pendiente 0.13

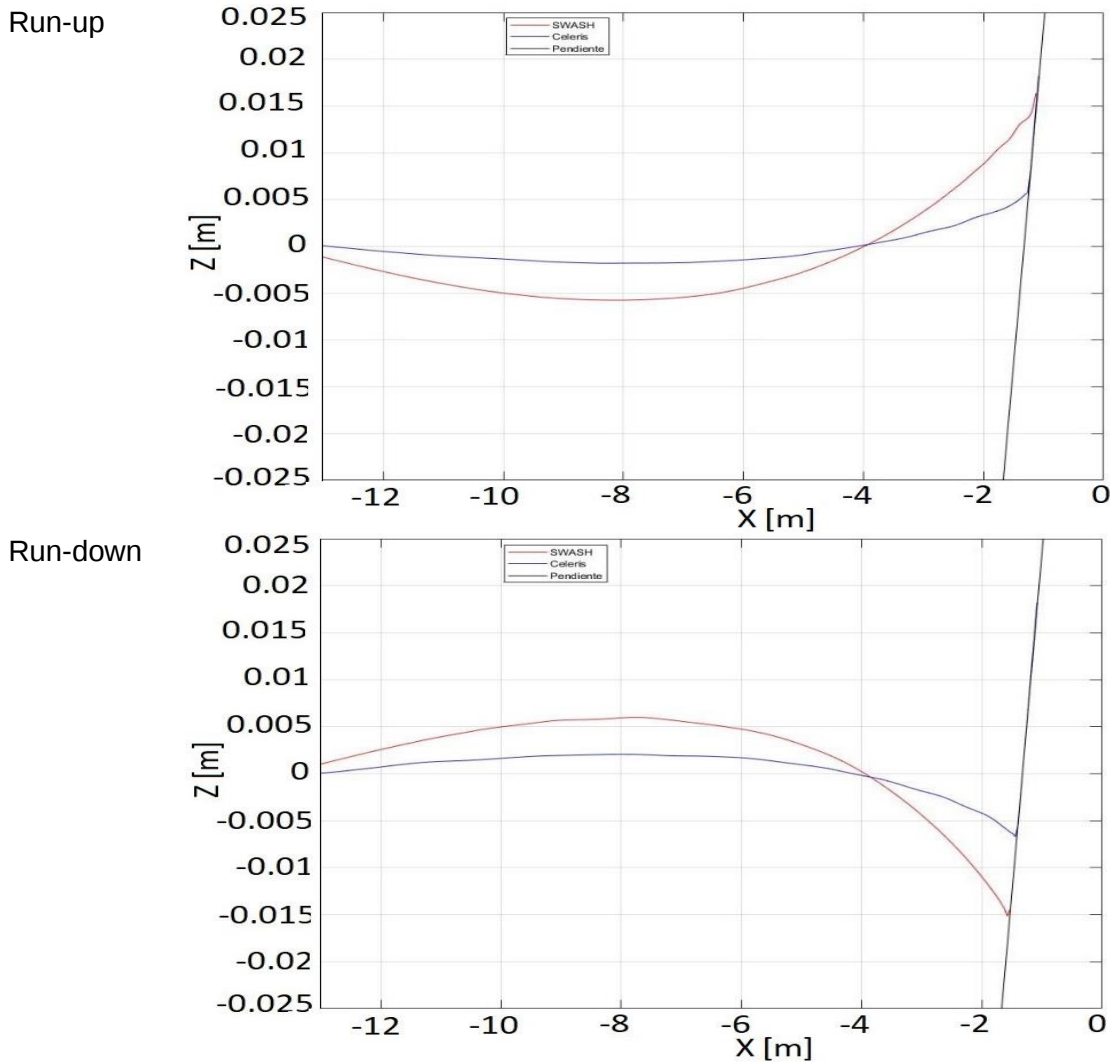


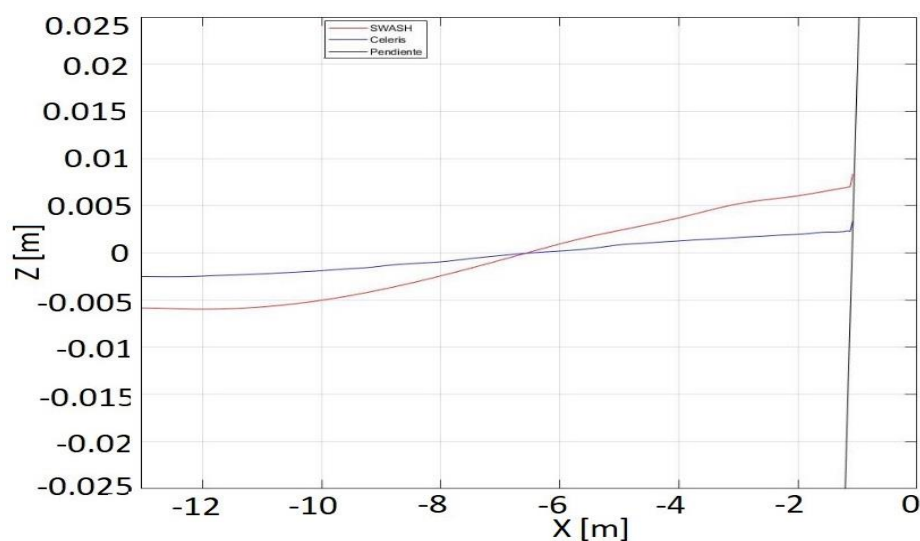
Ilustración 30: Run-up y run-down para una pendiente de 0.13 ambos modelos.

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó que la diferencia de distancias entre cada modelo para esta pendiente fue de 62.5% para el run-up y de 56.6% para el run-down, estas variaciones se exponen en la Ilustración 30.

Pendiente 0.26

Run-up



Run-down

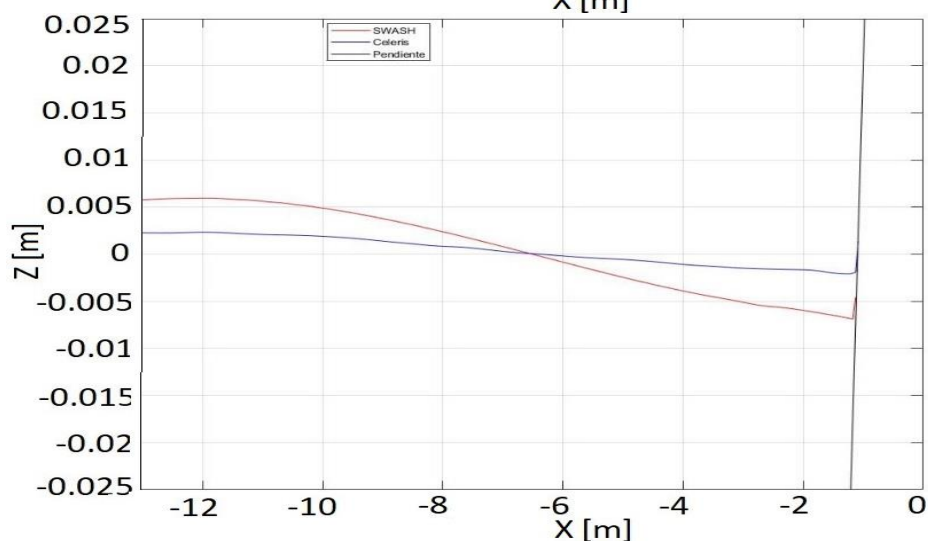


Ilustración 31: Run-up y run-down para una pendiente de 0.26, ambos modelos.

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre cada modelo para esta pendiente fue de 68.75% para el run-up y de 58.3% para el run-down.

Como se puede observar en la Ilustración 27, Ilustración 30 e Ilustración 31, para cada pendiente utilizada, Celeris presentó un run-up menor y subestimó la reflexión en lugares con pendientes más verticales.

En la Ilustración 32 e Ilustración 33, se presentan los valores máximos y mínimos obtenidos de las modelaciones anteriores respecto a las pendientes en cada caso.

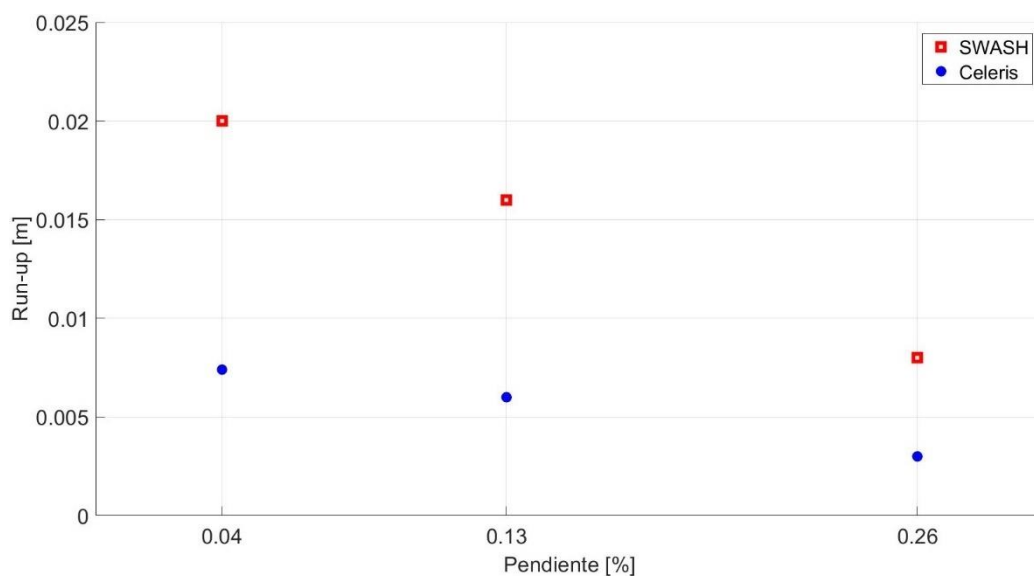


Ilustración 32: Comparación de Run-up con pendientes 0.04, 0.13 y 0.26

Fuente: Elaboración propia

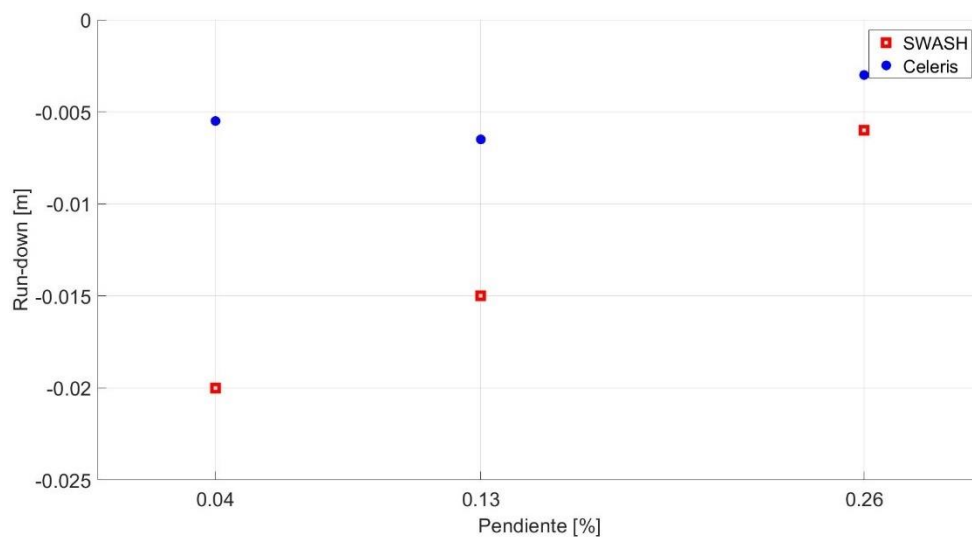


Ilustración 33: Comparación de Run-down con pendientes 0.04, 0.13 y 0.26

Fuente: Elaboración propia

Fueron claras las diferencias de los modelos para cada pendiente. Celeris subestimó el run-up, mientras que SWASH presentó resultados más adecuados a las condiciones impuestas.

6.1.3 OLEAJE IRREGULAR EN EL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

Para el oleaje irregular se siguió la metodología de la sección 5.1.

A continuación, se presenta el tipo de espectro con el cual se desarrollaron las modelaciones (Ilustración 34) y la desnivelación asociada (Ilustración 35).

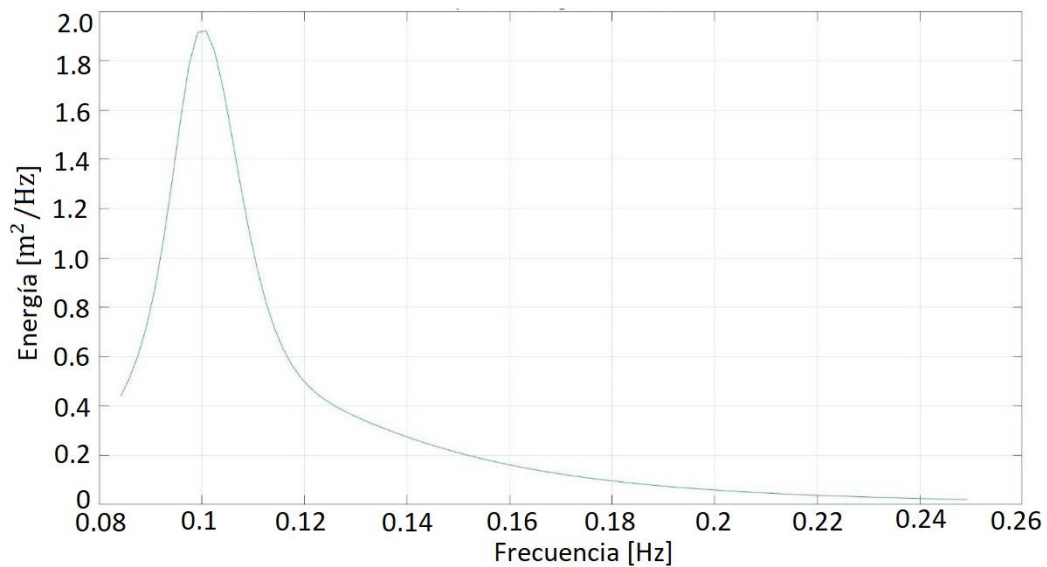


Ilustración 34: Espectro sintético JONSWAP.

Fuente: Elaboración propia.

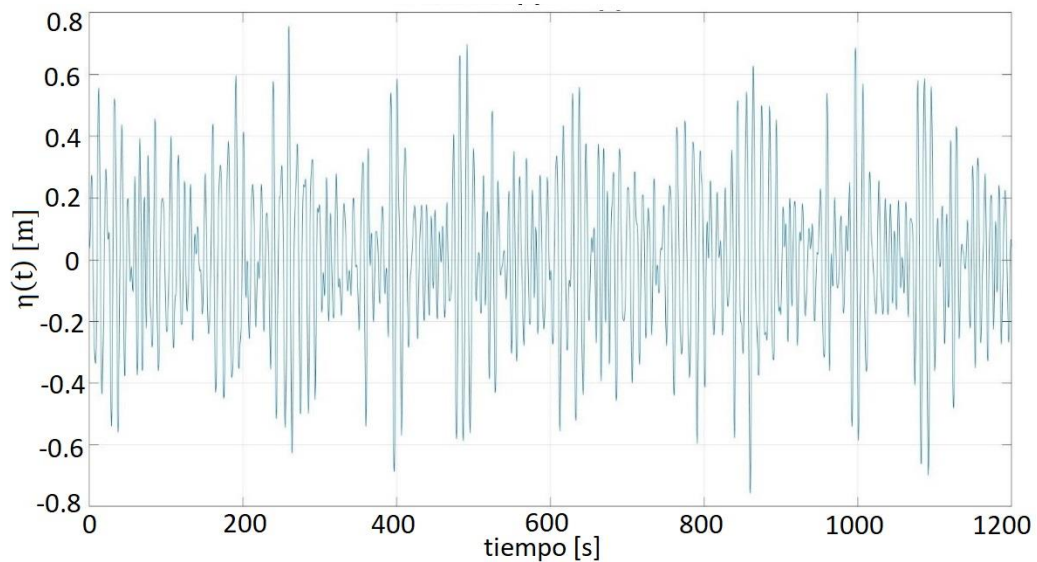


Ilustración 35: Desnivelaciones asociadas al espectro JONSWAP

Fuente: Elaboración propia.

A ambos modelos se ingresaron parámetros diferentes. En el caso de SWASH se ingresaron las frecuencias asociadas al espectro y la densidad espectral, mientras que a Celeris se introdujeron las amplitudes asociadas al espectro, los períodos, las direcciones medias y las fases de las 100 olas con las cuales se generó el espectro sintético. Con esos parámetros se modelaron 150 [s] para ambos modelos.

Los resultados de la modelación irregular siguieron el mismo comportamiento que en el caso regular, el modelo SWASH fue mucho más sensible al cambio en las pendientes que Celeris, por lo que el run-up tuvo un comportamiento similar al caso regular.

6.2 MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL, COEFICIENTES DE AGITACIÓN (ASOMERAMIENTO)

Para el segundo caso de oleaje regular, se utilizaron las condiciones de oleaje con las características mencionadas en la sección 5.2.

Se realizaron 11 modelaciones con alturas significativas unitarias, manteniendo todos los parámetros fijos excepto el período, el cual fue variado desde los 6 [s] a los 17 [s]. Es importante mencionar que para la profundidad en la cual comienza la batimetría, ya se encuentra en aguas someras, por lo que la no linealidad comienza a desarrollarse.

El período de 6 [s] fue el más pequeño en el que los modelos fueron estables, con valores inferiores presentaban inestabilidad o problemas en los resultados, esto debido a que la malla de cálculo debería ser más fina para resolver estos problemas, sin embargo, esto aumentaría considerablemente el tiempo de las modelaciones, por lo que se optó por no refinar más la malla de cálculo.

Como resultado de estas modelaciones, se obtuvieron los coeficientes de agitación para toda la longitud de la batimetría. Con esto se pudo identificar cual modelo fue más sensible al cambio de profundidad. En la Ilustración 37, Ilustración 38 e Ilustración 39, se presentan el comportamiento que tuvieron los modelos al asomeramiento, estas imágenes corresponden a los períodos de 6, 11 y 17 segundos respectivamente.

Antes es necesario definir el **coeficiente de agitación** como:

$$Ka = Ks * Kr * Kd \quad (32)$$

Donde:

Ka : Coeficiente de agitación.

Ks : Coeficiente de asomeramiento.

Kr : Coeficiente de refracción.

Kd : Coeficiente de difracción.

Para este caso el coeficiente de agitación sólo está determinado por el asomeramiento, por lo que queda expresado de la siguiente manera:

$$Ka = \frac{Hm_0(x)}{Hm_0(x = x_0)}; Hm_0 = 4\sqrt{m_0}; m_0 = \int_{fmin}^{fmax} S(f) df \quad (33)$$

Donde:

Hm_0 : Altura significativa espectral.

m_0 : Momento de orden cero.

$fmax$: Frecuencia máxima del oleaje.

$fmin$: Frecuencia mínima del oleaje.

$S(f)$: Densidad espectral.

Para tener una mejor perspectiva de los coeficientes de asomeramiento, en la Ilustración 36 se muestra la batimetría ideal en elevación.

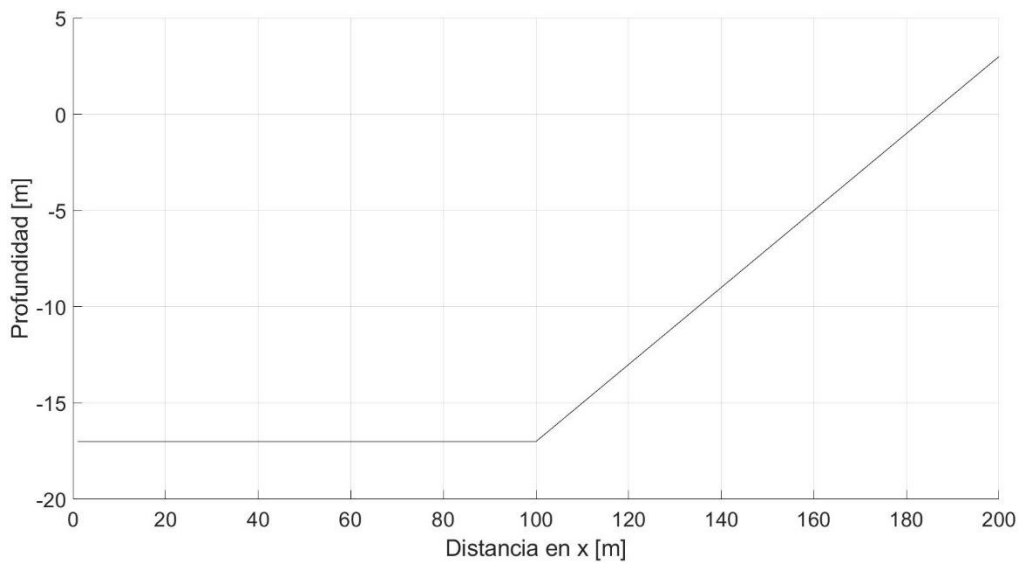


Ilustración 36: Batimetría ideal en elevación con pendiente 0.2.

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 37, la línea de color azul representa los coeficientes de asomeramiento de SWASH y la de color rojo los de Celeris.

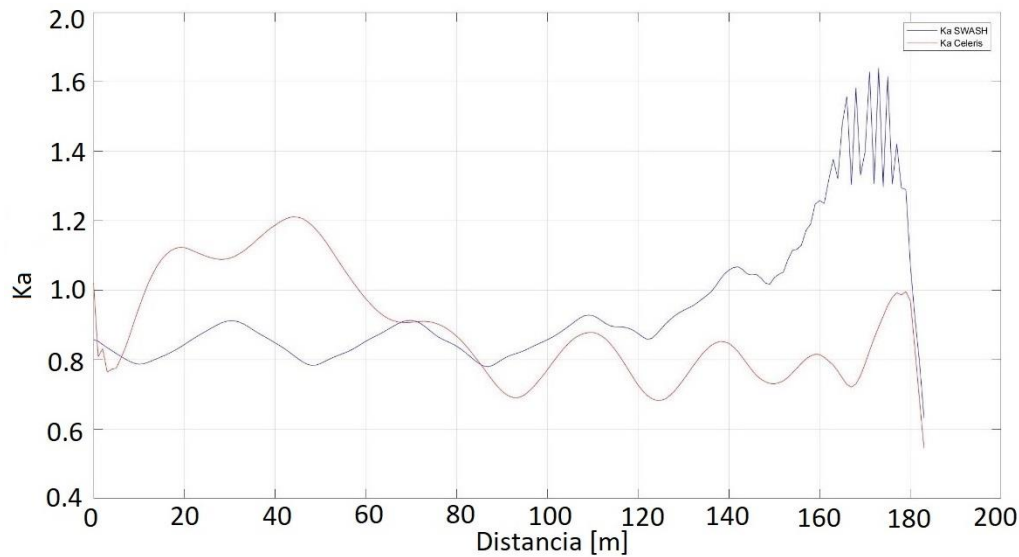


Ilustración 37: Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) $T_p=6$ [s]

Fuente: Elaboración propia.

En el punto cero ($x = 0$) donde se encuentra la paleta generadora, existieron algunas diferencias entre los coeficientes; esto es netamente producto de cómo cada modelo generó la perturbación de la superficie del agua.

Como se observa en la Ilustración 37, ambos modelos presentaron distintos coeficientes de agitación en todo el dominio.

SWASH tuvo un comportamiento físicamente más regular en toda la batimetría. Se muestra que los coeficientes comenzaron a aumentar cerca de los 100 [m], esto se debió a que inicia la pendiente de la playa, por lo que el asomeramiento fue mucho mayor y los fenómenos no lineales comenzaron a ser más importantes. Se observaron algunos comportamientos extraños entre los 160 [m] y 180 [m], esto se debió a que los fenómenos no lineales ya son muy importantes al llegar a 5 [m] de profundidad. Al ser un modelo no lineal y no poseer rotura, la energía no se disipa, por lo que aumenta la altura de la ola y por tanto el coeficiente de asomeramiento. Este comportamiento anómalo se debió al período pequeño de la modelación.

Celeris por su lado, al ser un modelo Boussinesq, cuenta con términos de dispersión de frecuencia (fenómeno lineal) que balancean los fenómenos no lineales. En los primeros metros desde la paleta generadora se produjo un aumento considerable en los coeficientes de agitación debido a la forma en que la paleta forzó el oleaje. Hacia la playa, los coeficientes disminuyeron siguiendo el mismo comportamiento que con SWASH, sin embargo, en este caso la dispersión de frecuencia produjo que se minimizaran los fenómenos no lineales, disminuyendo aún más las alturas y por ende el coeficiente de agitación. Como se mostró en los experimentos de la sección 6.1, Celeris no desarrolló de una forma apropiada el run-up y run-down, por lo que queda demostrado que no fue capaz de representar los fenómenos no lineales en las playas.

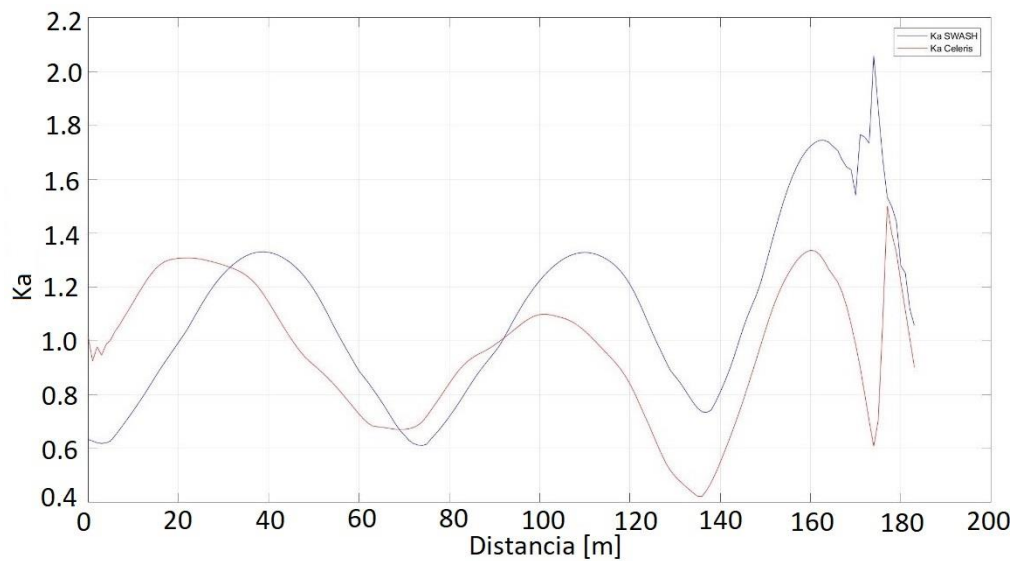


Ilustración 38: Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) $T_p=11$ [s]

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 38 corresponde a un período de 11 [s], con este período la longitud de onda es mayor, por lo que las alturas fueron en aumento desde el punto de origen hasta la playa. Según Green (1837), “*En la dinámica de fluidos, se describe la evolución de olas de gravedad que no rompen, y que se propagan en aguas poco profundas aumentando su altura al aproximarse a la costa*”. La ley de Green se usa a menudo en la ingeniería costera para la modelación de olas largas en una playa.

En este caso los coeficientes para ambos modelos fueron semejantes. Los coeficientes de agitación de Celeris, fueron aumentando desde que las olas atravesaban los 140 [m], donde la profundidad ya es muy reducida. Para SWASH, siguieron un comportamiento similar, donde la no linealidad comenzó a ser más importante. Entre los 160 [m] y 175 [m] ambos modelos tuvieron el mismo comportamiento, con los peaks marcados debido al run-up y al run-down.

Para la modelación con Celeris, los coeficientes tuvieron un descenso al llegar a los 100 [m] de distancia, esta disminución del coeficiente se debe a la dispersión de frecuencia de las ecuaciones de Boussinesq, que al acercarse a la costa balancean la no linealidad produciendo que no se desarrollen completamente los fenómenos no lineales.

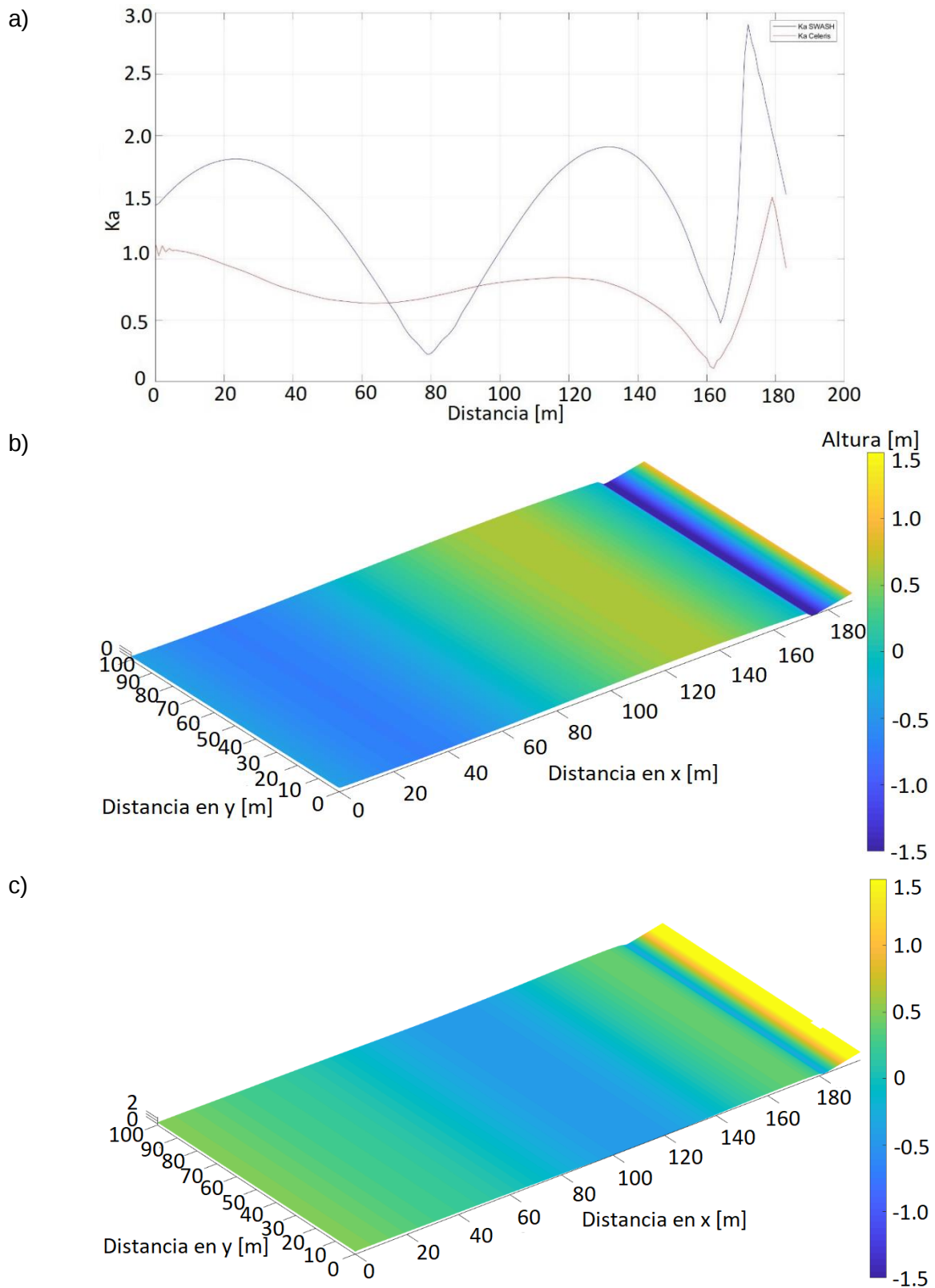


Ilustración 39: a) Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) $T_p=17$ [s]. b) Gráfico 3D Run-up y rompiente. c) Gráfico 3D Run-down.

Fuente: Elaboración propia

Al ser un modelo no lineal, SWASH presentó una mayor sensibilidad a los fenómenos no lineales, mientras que Celeris realizó un balance de estos fenómenos con los términos dispersivos.

De la Ilustración 39a se pudo el run-up, el run-down y que el lugar donde se dio el coeficiente más bajo fue en los 163 [m] para ambos modelos, sólo diferenciados por unos cuantos centímetros.

Para el caso de SWASH se produjo un efecto de reflexión, en donde se amplificaron los máximos y mínimos (Ilustración 39a). Se destaca, que al ser una batimetría ideal sin porosidad y el oleaje poseer un período de 17 [s], se genera un oleaje cuasi-estacionario entre la ola entrante y la ola reflejada. Esto se puede observar en la Ilustración 39b e Ilustración 39c.

Con Celeris, la reflexión, el run-up y el run-down fueron menores, siguiendo con lo presentado en la Ilustración 24c del experimento de Lynett et al. (2002).

No fue posible realizar una comparación con un caso validado, sólo se realizó una comparación entre ambos modelos. En base a los resultados de la sección 6.2, SWASH debiese ser el que resuelve este caso con mayor precisión.

6.3 MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

Para mostrar cómo es que los modelos resolvieron las condiciones de oleaje ingresadas, en la Ilustración 40, se muestran imágenes de la propagación realizada con el modelo SWASH, donde se presenta el patrón de propagación cada 60 [s].

Para esta modelación se utilizó una altura de 1 [m], un período de 12 [s] y una dirección W.

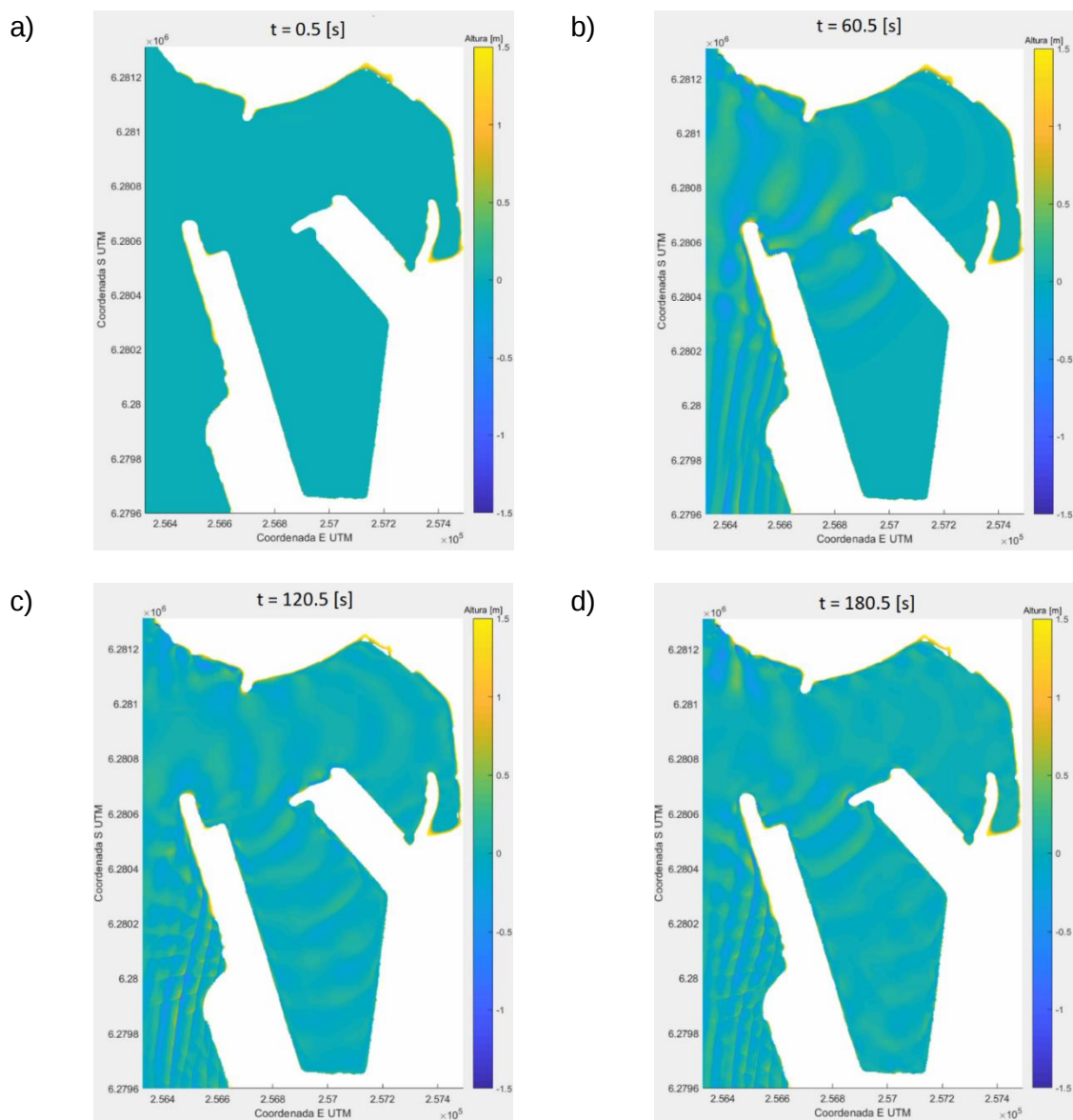


Ilustración 40: Propagación de oleaje con el modelo SWASH. a) 0.5 [s], b) 60.5 [s], c) 120.5 [s] y d) 180.5 [s]

Fuente: Elaboración propia

6.3.1 DESNIVELACIONES Y ESPECTROS

Para la modelación real (sección 5.3.1), se utilizó la batimetría del puerto de San Antonio y distintos casos de oleaje a partir de espectros sintéticos direccionales (sección 5.3.3). Los datos con los cuales se crearon estos espectros se encuentran en el Anexo sección 1D.

Se corrieron 560 casos en SWASH y 661 en Celeris para la dirección Oeste, 243 casos en SWASH y 207 en Celeris para la dirección Oeste-Noroeste. Con estas modelaciones se obtuvieron una serie de desnivelaciones que fueron registradas en tres nodos de interés (Ilustración 22). Una muestra de las desnivelaciones obtenidas se presenta en la Ilustración 41.

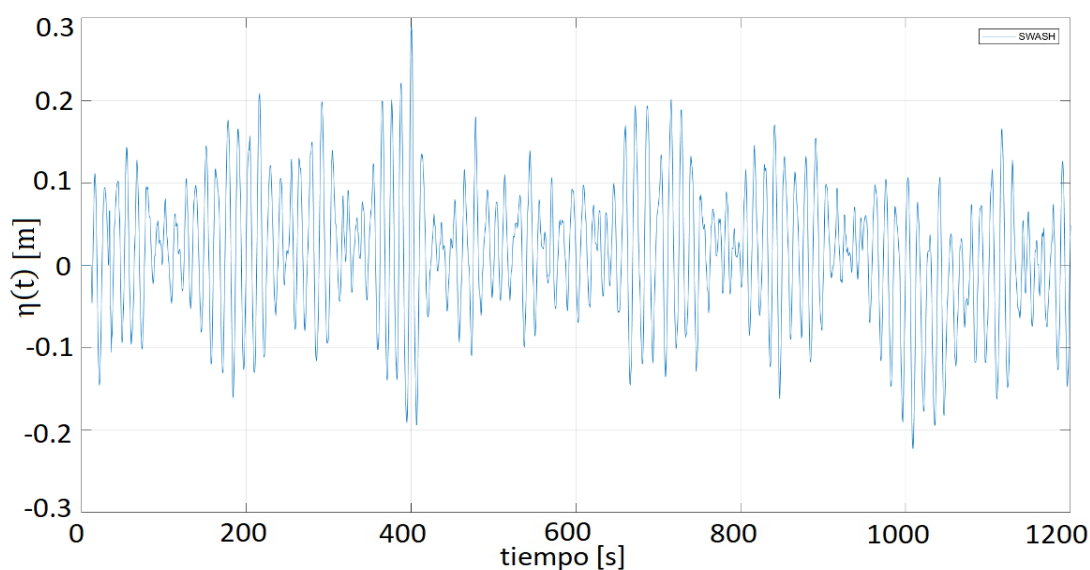


Ilustración 41: Ejemplo de desnivelaciones en nodo sitio 9

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron los espectros de energía/frecuencia, los espectros direccionales, la altura significativa espectral, la altura significativa del tercio superior, el período peak, la dirección peak, entre otros.

En la Ilustración 43 e Ilustración 44, se presentan ejemplos de los dos tipos de espectros que fueron obtenidos a partir de las desnivelaciones, el espectro de frecuencias y el espectro direccional. Ambos espectros son el resultado de sólo una combinación de altura y período que fue realizada con el modelo SWASH en el sitio 9. Las condiciones que se ingresaron al modelo con las cuales se realizó esta modelación, fueron una altura de 0.76123 [m] y un período peak de 12.84 [s].

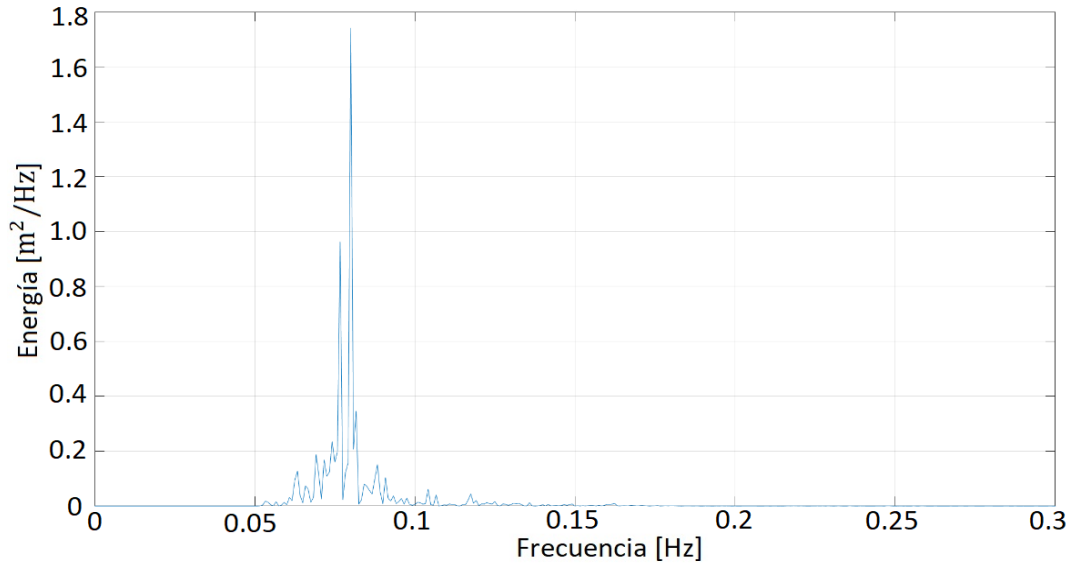


Ilustración 42: Espectro de frecuencias.

Fuente: Elaboración propia.

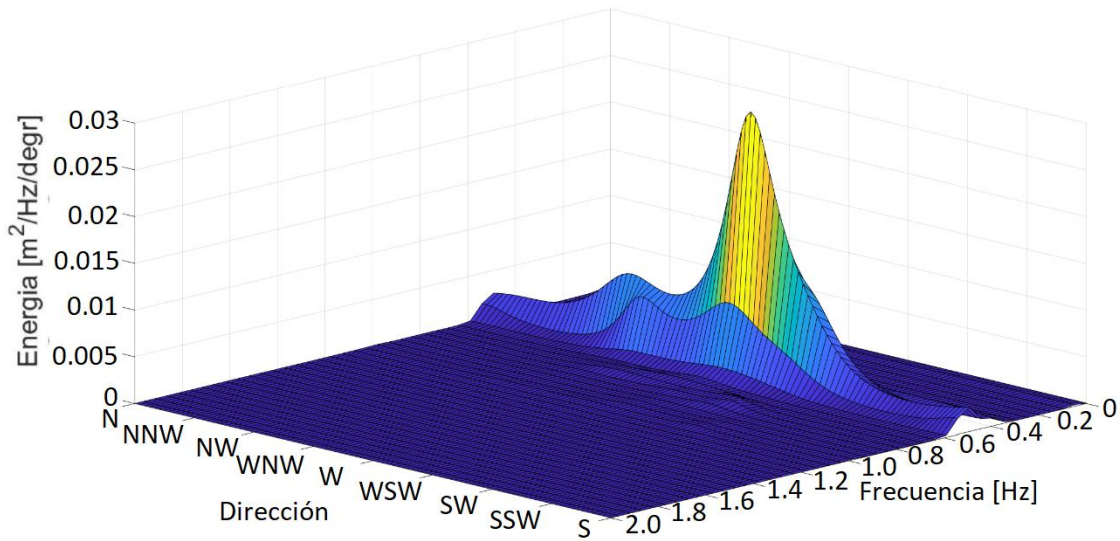


Ilustración 43: Espectro direccional

Fuente: Elaboración propia.

Estos espectros fueron los utilizados para obtener los parámetros de resumen de ambos modelos en el sitio 9. Del espectro de frecuencia se obtuvieron la mayoría de los parámetros antes mencionados; en tanto que del espectro direccional sólo se obtuvo la dirección peak asociada a la máxima energía.

6.3.2 PARÁMETROS DE RESUMEN Y CORRELACIONES

Luego de procesar los parámetros espectrales, fueron construidas tablas de incidencia, gráficos de excedencia y correlaciones de los nodos de interés.

En este capítulo se presentan los resultados en el sitio 9. Se exponen en el orden de SWASH en primer lugar y Celeris en segundo lugar. El cruce de datos en las tablas de incidencia es de altura significativa/período peak, altura significativa/dirección peak y período peak/dirección peak.

Datos registrados en el sitio 9

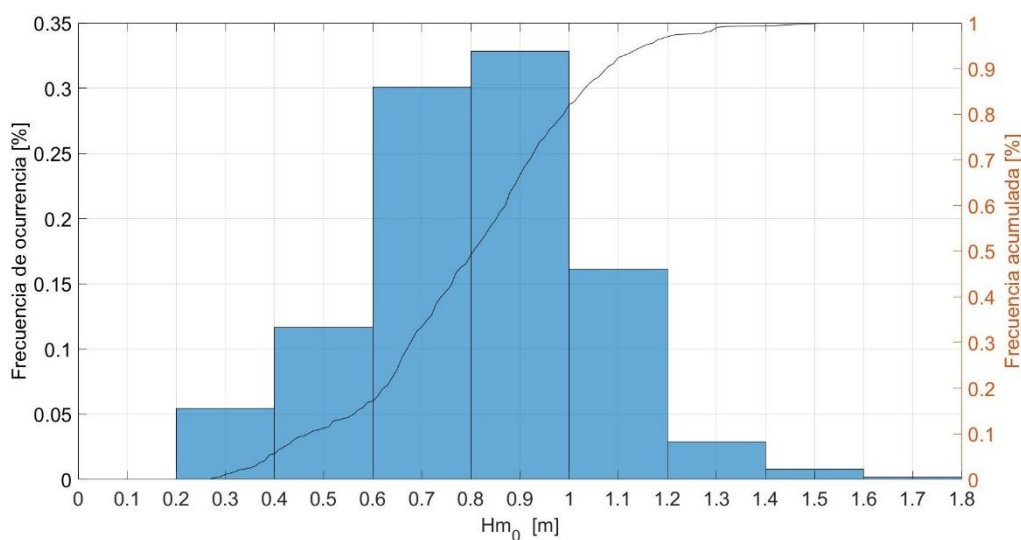


Ilustración 44: Histograma de alturas significativas espectrales sitio 9

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 44 corresponde al histograma Hm0 del sitio 9, en el cual se observan que las alturas más frecuentes se encontraron entre los 0.6 [m] hasta los 1.2 [m] con el 62.82% de las alturas.

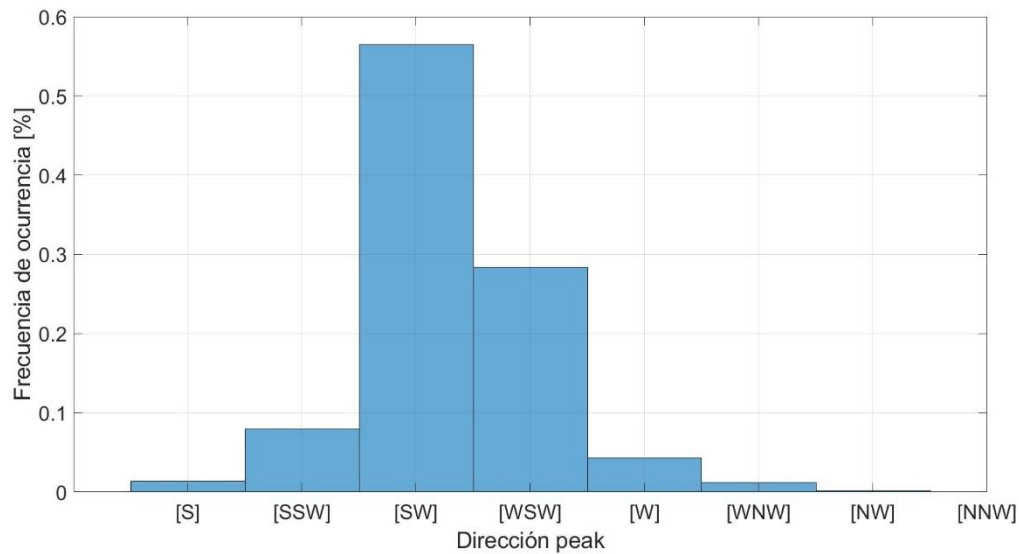


Ilustración 45: Histograma de direcciones peak sitio 9

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 45 se presenta el histograma de direcciones peak, donde las direcciones peak más frecuentes fueron SW y WSW, con el 84.85% de los casos.

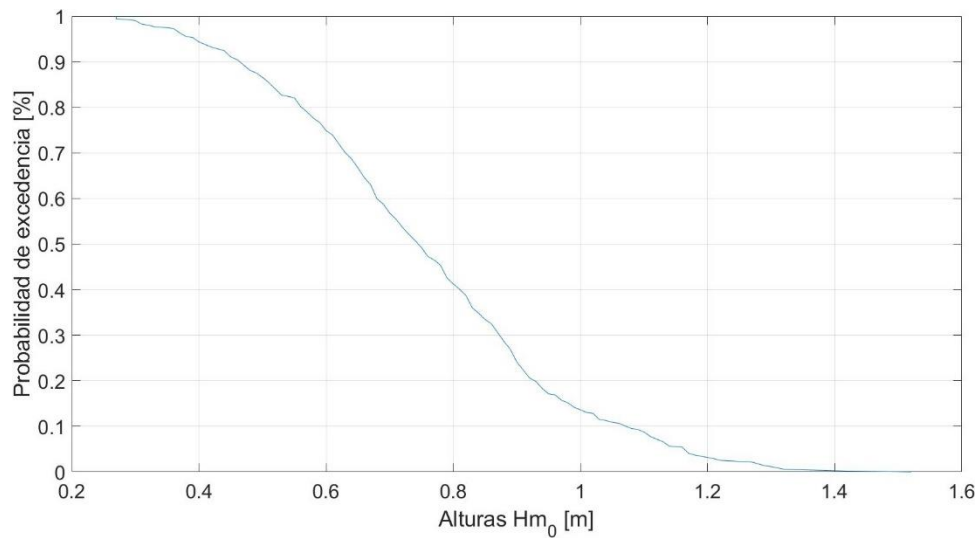


Ilustración 46: Curva de excedencia H_{m0} sitio 9

Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 46 contiene la curva de excedencia de las alturas significativas espectrales del sitio 9. Se observa que los intervalos en los cuales la excedencia fue mayor, correspondieron a alturas entre los 0.2 [m] a los 0.5 [m], con una probabilidad de excedencia mayor al 90%, mientras que las alturas con menor probabilidad de excedencia se encontraron en el intervalo 1.15 [m] a 1.5 [m] con una probabilidad inferior al 10%.

Tp [s]	Hm0 [m]						
	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	Total	F. relativa	F. acumulada
4-7	9	97	29		135	26.21%	100.00%
7-10	17	159	48	2	226	43.88%	73.79%
10-13	9	83	22	2	116	22.52%	29.90%
13-16	12	12			24	4.66%	7.38%
16-19	9	5			14	2.72%	2.72%
Total	56	356	99	4	515		
F. relativa	10.87%	69.13%	19.22%	0.78%			
F. acumulada	100.00%	89.13%	20.00%	0.78%			

Tabla 3: Tabla de incidencia datos sitio 9, Altura significativa espectral/Período peak

Fuente: Elaboración propia.

Dp [°]		Hm0 [m]						
		0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	Total	F. relativa	F. acumulada
S	168.75-191.25		7			7	1.36%	100.00%
SSW	191.25-213.75	8	27	5	1	41	7.96%	98.64%
SW	213.75-236.25	25	210	54	2	291	56.50%	90.68%
WSW	236.25-258.75	11	95	39	1	146	28.35%	34.17%
W	258.75-281.25	7	14	1		22	4.27%	5.83%
WNW	281.25-303.75	4	2			6	1.17%	1.55%
NW	303.75-326.25	1				1	0.19%	0.39%
NNW	326.25-348.75		1			1	0.19%	0.19%
Total		56	356	99	4	515		
F. relativa		10.87%	69.13%	19.22%	0.78%			
F. acumulada		100.00%	89.13%	20.00%	0.78%			

Tabla 4: Tabla de incidencia datos sitio 9, Altura significativa espectral/Dirección peak.

Fuente: Elaboración propia.

Dp [°]		Tp [s]							
		4-7	7-10	10-13	13-16	16-19	Total	F. relativa	F. acumulada
S	168.75-191.25		3	4			7	1.36%	100.00%
SSW	191.25-213.75	2	3	25	4	7	41	7.96%	98.64%
SW	213.75-236.25	61	147	70	8	5	291	56.50%	90.68%
WSW	236.25-258.75	59	70	14	3		146	28.35%	34.17%
W	258.75-281.25	13	3	2	4		22	4.27%	5.83%
WNW	281.25-303.75			1	4	1	6	1.17%	1.55%
NW	303.75-326.25				1		1	0.19%	0.39%
NNW	326.25-348.75					1	1	0.19%	0.19%
	Total	135	226	116	24	14	515		
	F. relativa	26.21%	43.88%	22.52%	4.66%	2.72%			
	F. acumulada	100.00%	73.79%	29.90%	7.38%	2.72%			

Tabla 5: Tabla de incidencia datos sitio 9, Período peak/Dirección peak.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5, representan como el oleaje incide en el sitio 9. Con estos datos se realizó la comparación con ambos modelos.

En la Tabla 3 se presentan los intervalos con las alturas y períodos más frecuentes, estos fueron entre los 0.5 [m] a los 1.5 [m] con el 88.35%, y entre los 4 [s] a los 13 [s] con un 92.61% de los períodos peak.

La Tabla 4, muestra una acumulación de olas incidiendo desde las direcciones SW y WSW con un 84.85%.

En la Tabla 5, se observa que los períodos entre los 7 [s] a 13 [s], provinieron principalmente de la dirección SW. Los máximos períodos registrados se encontraron en los 16 [s] a los 19 [s], provenientes de la dirección SW y SSW.

Resultados obtenidos con SWASH

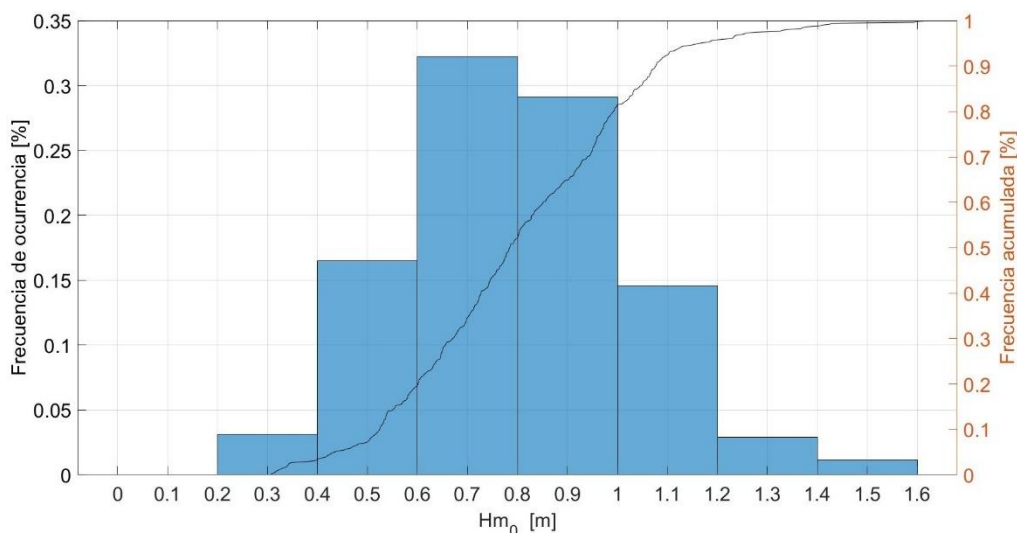


Ilustración 47: Histograma de alturas significativas espectrales nodo sitio 9, SWASH

Fuente: Elaboración propia

En el histograma de la Ilustración 47, las alturas más frecuentes se agruparon entre los 0.4 [m] y los 1.2 [m], con una frecuencia del 91.5% de los casos dentro de ese intervalo.

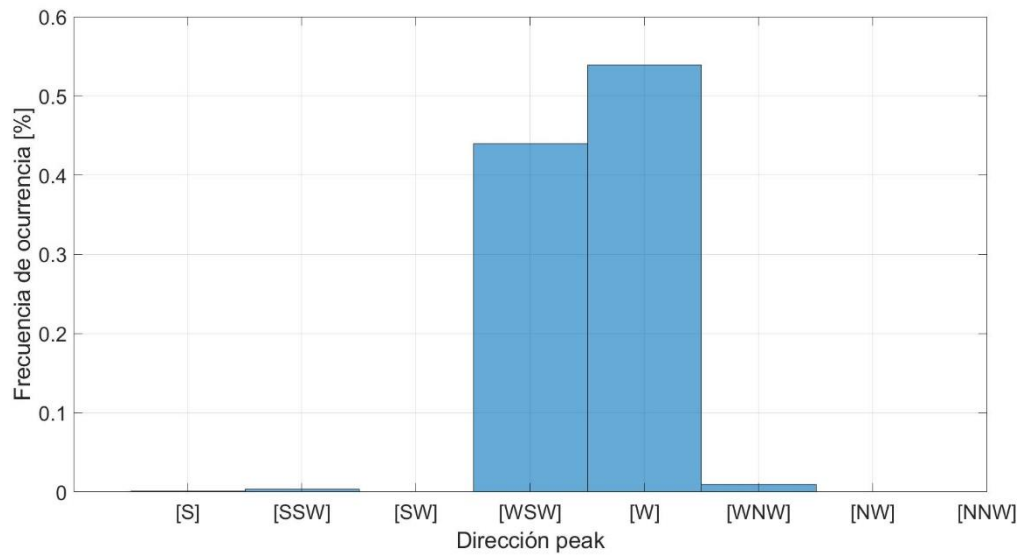


Ilustración 48: Histograma de direcciones peak nodo sitio 9, SWASH

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 48, se muestran las direcciones peak obtenidas en la modelación del sitio 9 con SWASH. Las direcciones más frecuentes correspondieron al WSW y W, con una ocurrencia del 98%.

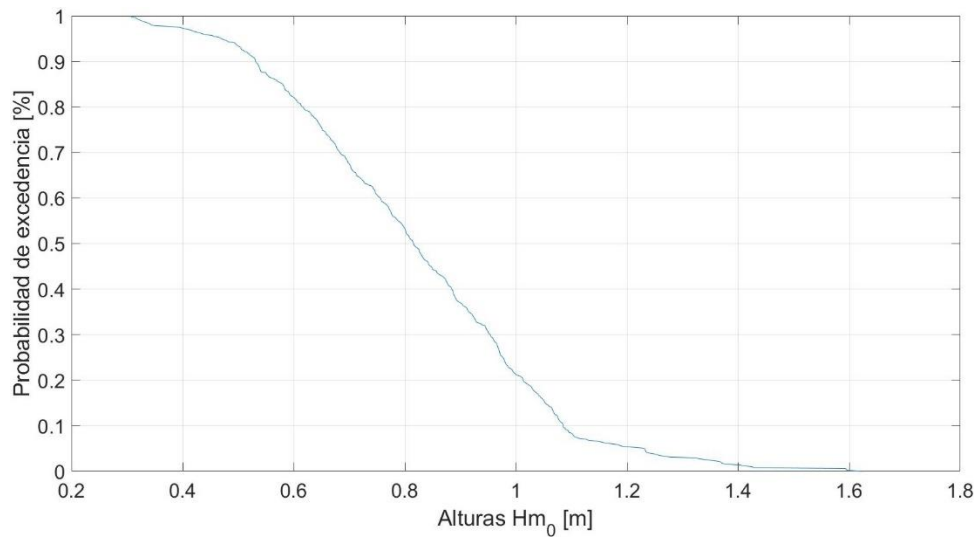


Ilustración 49: Curva de excedencia H_{m0} nodo sitio 9, SWASH

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 49 se expone que los valores con mayor excedencia se localizaron entre los 0.2 [m] y los 0.57 [m], con una probabilidad mayor al 90%, mientras que los con una probabilidad inferior al 10% estuvieron entre los 1.1 [m] a los 1.6 [m].

Tp [s]	Hm0 [m]								Total	F. relativa	F. acumulada
	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	>1.6			
9-11	12	23	23						58	7.22%	100.00%
11-13	6	42	128	138	48	12	2		376	46.82%	92.78%
13-15	7	64	86	96	39	9	3	1	305	37.98%	45.95%
15-17		3	22		22			3	50	6.23%	7.97%
17-19					8	2	4		14	1.74%	1.74%
Total	25	132	259	234	117	23	9	4	803		
F. relativa	3.11%	16.44%	32.25%	29.14%	14.57%	2.86%	1.12%	0.50%			
F. acumulada	100.00%	96.89%	80.45%	48.19%	19.05%	4.48%	1.62%	0.50%			

Tabla 6: Tabla de incidencia sitio 9 SWASH, Altura significativa espectral/Período peak

Fuente: Elaboración propia.

Dp [°]		Hm0 [m]								Total	F. relativa	F. acumulada
		0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6	>1.6			
S	168.75-191.25				1					1	0.12%	100.00%
SSW	191.25-213.75		2	2	1					5	0.62%	99.88%
WSW	236.25-258.75	8	53	88	170	47	7	2	1	376	46.82%	99.25%
W	258.75-281.25	15	73	168	62	69	16	7	3	413	51.43%	52.43%
WNW	281.25-303.75	2	4	1		1				8	1.00%	1.00%
Total		25	132	259	234	117	23	9	4	803		
F. relativa		3.11%	16.44%	32.25%	29.14%	14.57%	2.86%	1.12%	0.50%			
F. acumulada		100.00%	96.89%	80.45%	48.19%	19.05%	4.48%	1.62%	0.50%			

Tabla 7: Tabla de incidencia datos sitio 9 SWASH, Altura significativa espectral/Dirección peak.

Fuente: Elaboración propia.

Dp [°]		Tp [s]						Total	F. relativa	F. acumulada
		9-11	11-13	13-15	15-17	17-19				
S	168.75-191.25			1				1	0.12%	100.00%
SSW	191.25-213.75				5			5	0.62%	99.88%
WSW	236.25-258.75	22	179	137	29	9		376	46.82%	99.25%
W	258.75-281.25	36	193	165	16	3		413	51.43%	52.43%
WNW	281.25-303.75		4	2		2		8	1.00%	1.00%
Total		58	376	305	50	14		803		
F. relativa		7.22%	46.82%	37.98%	6.23%	1.74%				
F. acumulada		100.00%	92.78%	45.95%	7.97%	1.74%				

Tabla 8: Tabla de incidencia datos sitio 9 SWASH, Período peak/Dirección peak

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6, Tabla 7 y Tabla 8, se observan los datos obtenidos con el modelo SWASH. Las alturas significativas en el nodo fueron desde los 0.2 [m] a los 1.6 [m]. Las mayores alturas de ola se agruparon en los intervalos de 0.4 [m] a 1.2 [m], con un total de 92.4%. El rango de los períodos peak fueron desde los 9 [s] a los 19 [s]. Los períodos con mayor ocurrencia se encontraron en los intervalos de 11 [s] a 15 [s] con un total de 84.8%. Las direcciones incidieron principalmente desde el WSW y W, con un total de 98.25% de los datos modelados. Las características de las olas que incidieron con mayor frecuencia fueron alturas de entre 0.6 [m] a 1 [m], períodos de 11 [s] a 15 [s] y dirección WSW a W

En la Ilustración 50 e Ilustración 51, se presentan el histograma combinado y la correlación entre la modelación realizada con SWASH y los registros del sitio 9.

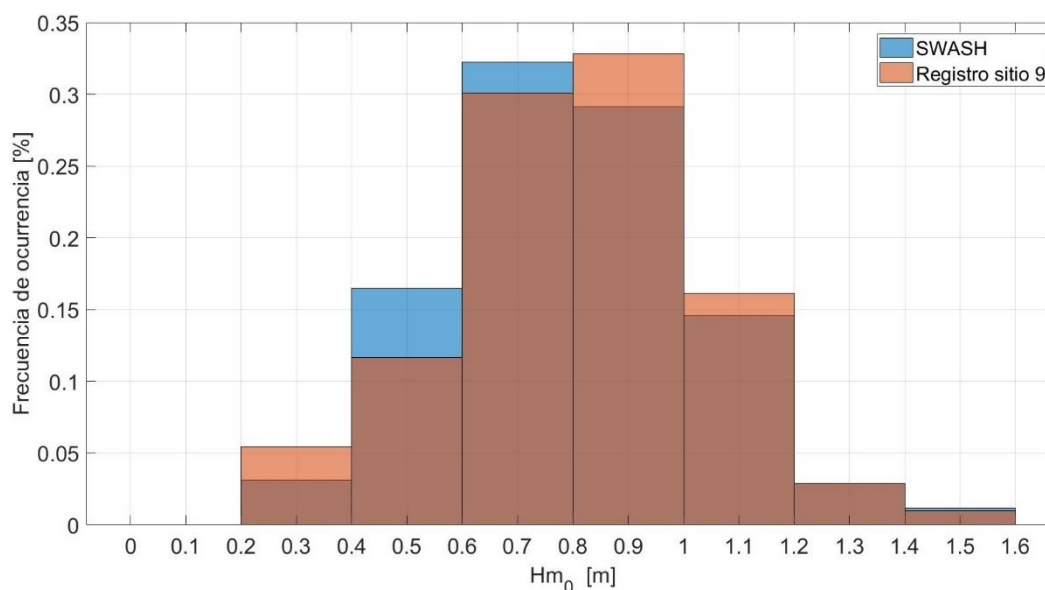


Ilustración 50: Histograma combinado de Hm0, SWASH y registros sitio 9.

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 50, se observa que las alturas significativas entre el modelo SWASH y los registros del sitio 9, se asemejaron mayormente en los intervalos superiores a 0.6 [m]. En la Tabla 9, se muestran las ocurrencias y los intervalos con sus respectivas diferencias.

Frecuencia de ocurrencia	Intervalos [m]						
	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0	1.0-1.2	1.2-1.4	1.4-1.6
SWASH	3.10%	16.50%	32.20%	29.10%	14.50%	2.90%	1.10%
Sitio 9	5.40%	11.60%	30.10%	32.80%	16.10%	2.90%	0.90%
Diferencia	2.30%	4.90%	2.10%	3.70%	1.60%	0.00%	0.20%

Tabla 9: Comparación de ocurrencias en intervalos, SWASH y registros sitio 9.

Fuente: Elaboración propia.

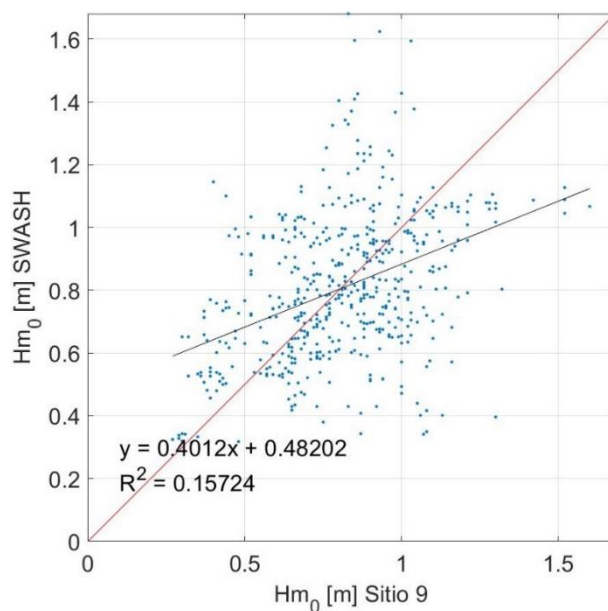


Ilustración 51: Correlación entre modelo SWASH y datos sitio 9

Fuente: Elaboración propia.

La correlación entre los datos del mareógrafo en el sitio 9 y los datos obtenidos de la modelación no fue buena. La pendiente de la recta de regresión fue de 0.4, mientras que el coeficiente R^2 fue de 0.15, con un error medio cuadrático de 0.0648, lo que expone que los resultados obtenidos por el modelo no se aproximaron a los datos in situ, aunque el error fue bajo. La covarianza fue de 0.053, lo que indicó que no hubo una relación directa ni inversa entre los datos. Mientras que el sesgo fue de 0.41, por lo que existió una pequeña tendencia hacia valores menores, lo que fue consecuente con el histograma en la Ilustración 50.

Cómo se muestra en la Ilustración 51, hubo una gran dispersión de los datos. Sin embargo, en las tablas de incidencia se puede cotejar que hubo una aproximación de las alturas a los datos registrados en el sitio 9.

Resultados obtenidos con Celeris

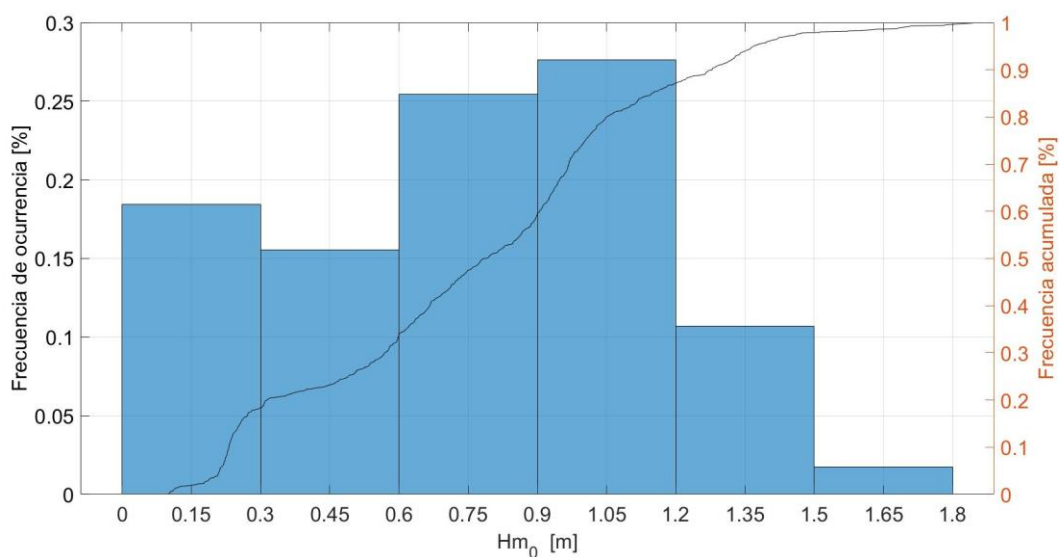


Ilustración 52: Histograma de alturas significativas espectrales, nodo sitio 9 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos con Celeris no se agruparon en un intervalo específico, las alturas significativas se encontraban distribuidas en todos los intervalos. Sin embargo, también se observa en la Ilustración 52, que donde se obtuvieron mayor cantidad de datos fue entre los 0 [m] y los 1.2 [m], donde se encontraron el 87.1% de las alturas. Dentro de estos intervalos se destacaron los que comprendieron desde los 0.6 [m] hasta los 1.2 [m], que agruparon el 53.11%.

Se registraron alturas pequeñas con una alta ocurrencia desde los 0 [m] hasta los 0.3 [m], esto debido a pequeñas olas reflejadas en las intersecciones tierra-agua de la malla de cálculo que pueden ser consideradas como inestabilidades del modelo, por lo que pueden desestimarse.

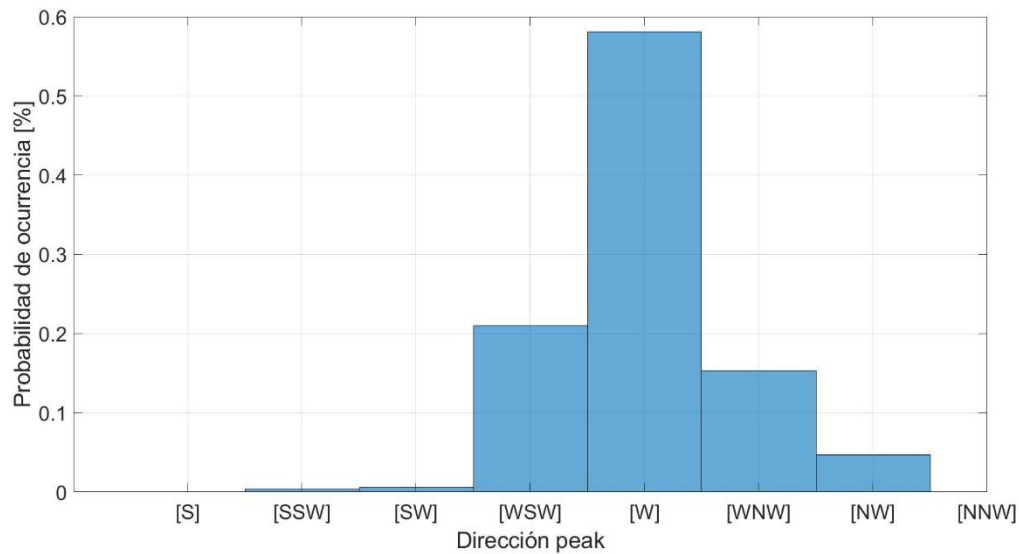


Ilustración 53: Histograma de direcciones peak, nodo sitio 9 Celeris

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 53 se exponen las direcciones peak registradas. Para estas modelaciones la dirección principal de incidencia fue el W, donde se encontró el 58.06% de la energía. En menor proporción le siguen el oleaje del WSW, WNW y NW, con una ocurrencia del 20.97%, 15.32% y 4.72% respectivamente. Es interesante el observar que en estas modelaciones se obtuvieron direcciones del NW, situación que no ocurrió con SWASH.

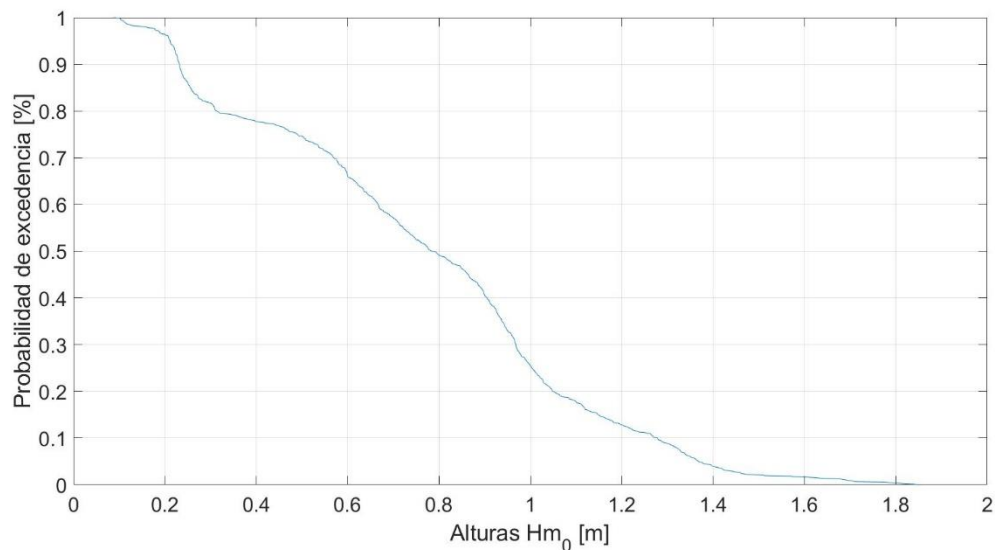


Ilustración 54: Curva de excedencia H_{m0} nodo sitio 9 Celeris

Fuente: Elaboración propia

En el caso de Celeris la curva de excedencia (Ilustración 54), presenta una mayor variabilidad. Las alturas con mayor probabilidad de excedencia se hallaron entre los 0.08 [m] y los 0.23 [m] con un 90%, seguido del intervalo desde los 0.23 [m] hasta los 0.31 [m], con una probabilidad del 80%. Respecto a las alturas con menor probabilidad de excedencia, se encontraron las de 1.27 [m] hasta los 2 [m] con menos de un 10%.

Tp [s]	Hm0 [m]							Total	F. relativa	F. acumulada
	0-0.3	0.3-0.6	0.6-0.9	0.9-1.2	1.2-1.5	1.5-1.8	1.8-2.1			
7-9	13	2	1		2			18	2.07%	100.00%
9-11	24	5	5					34	3.92%	97.93%
11-13	17	14	93	158	80	15	4	381	43.89%	94.01%
13-15	60	65	76	77	9			287	33.06%	50.12%
15-17	46	46	45	5	2			144	16.59%	17.05%
17-19		2						2	0.23%	0.46%
19-21		1	1					2	0.23%	0.23%
Total	160	135	221	240	93	15	4	868		
F. relativa	18.43%	15.55%	25.46%	27.65%	10.71%	1.73%	0.46%			
F. acumulada	100.00%	81.57%	66.01%	40.55%	12.90%	2.19%	0.46%			

Tabla 10: Tabla de incidencia sitio 9 Celeris, Altura significativa espectral/Período peak

Fuente: Elaboración propia.

Dp [°]		Hm0 [m]							Total	F. relativa	F. acumulada
		0-0.3	0.3-0.6	0.6-0.9	0.9-1.2	1.2-1.5	1.5-1.8	1.8-2.1			
SSW	191.25-213.75	3							3	0.35%	100.00%
SW	213.75-236.25	4		1					5	0.58%	99.65%
WSW	236.25-258.75	110	62	10					182	20.97%	99.08%
W	258.75-281.25	41	60	164	158	67	12	2	504	58.06%	78.11%
WNW	281.25-303.75	1	8	26	67	26	3	2	133	15.32%	20.05%
NW	303.75-326.25	1	5	20	15				41	4.72%	4.72%
Total		160	135	221	240	93	15	4	868		
F. relativa		18.43%	15.55%	25.46%	27.65%	10.71%	1.73%	0.46%			
F. acumulada		100.00%	81.57%	66.01%	40.55%	12.90%	2.19%	0.46%			

Tabla 11: Tabla de incidencia datos sitio 9 Celeris, Altura significativa espectral/Dirección peak.

Fuente: Elaboración propia.

Dp [°]		Tp [s]							Total	F. relativa	F. acumulada
		7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21			
SSW	191.25-213.75		3						3	0.35%	100.00%
SW	213.75-236.25	1	3		1				5	0.58%	99.65%
WSW	236.25-258.75	2	2	17	91	68	2		182	20.97%	99.08%
W	258.75-281.25	12	25	241	155	71			504	58.06%	78.11%
WNW	281.25-303.75	2		95	32	3		1	133	15.32%	20.05%
NW	303.75-326.25	1	1	28	8	2		1	41	4.72%	4.72%
Total		18	34	381	287	144	2	2	868		
F. relativa		2.07%	3.92%	43.89%	33.06%	16.59%	0.23%	0.23%			
F. acumulada		100.00%	97.93%	94.01%	50.12%	17.05%	0.46%	0.23%			

Tabla 12: Tabla de incidencia datos sitio 9 Celeris, Período peak/Dirección peak

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 10 Tabla 11 y Tabla 12, se presentan los datos obtenidos con el modelo Celeris. Las alturas significativas en el nodo fueron desde los 0.23 [m] hasta los 1.84 [m]. Las mayores alturas de ola se agruparon en los intervalos de 0.6 [m] a 1.2 [m], con un total de 53.11%. El rango de los períodos peak fueron desde los 7 [s] a los 21 [s]. Los períodos con mayor frecuencia de ocurrencia se encontraron en los intervalos de 11 [s] a 17 [s], con un total de 94.08%. En cuanto a las direcciones de incidencia, principalmente se registraron olas provenientes desde el WSW y W, con un total de 79.03%. Sin embargo, también se registraron desde la dirección WNW, que agrupó el 15.32% de los datos, esta dirección sólo fue obtenida con Celeris.

A continuación, en la Ilustración 55 e Ilustración 56, se presenta el histograma combinado y la correlación entre la modelación realizada con Celeris y los registros del sitio 9.

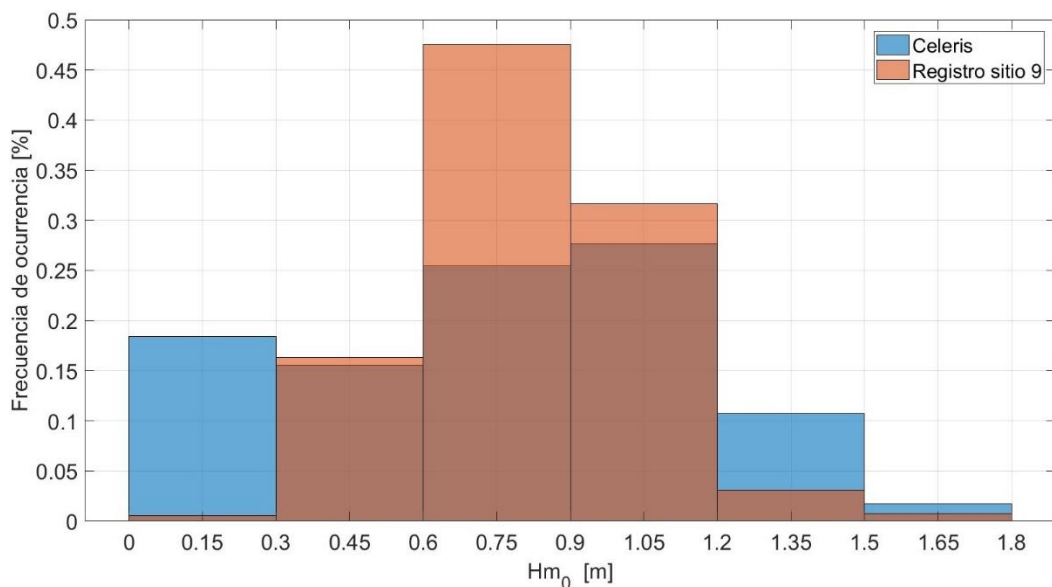


Ilustración 55: Histograma combinado de Hm0, Celeris y registros sitio 9

Fuente: Elaboración propia.

En la Ilustración 55, se observa que las alturas significativas entre el modelo Celeris y los registros del sitio 9, no se asemejaron en casi ningún intervalo, sólo fue posible hallar una similitud entre las alturas que van desde los 0.3 a 0.6, 0.9 a 1.2 y 1.5 a 1.8. En la Tabla 13, se muestran las ocurrencias y los intervalos con sus respectivas diferencias.

Frecuencia de ocurrencia	Intervalos [m]					
	0-0.3	0.3-0.6	0.6-0.9	0.9-1.2	1.2-1.5	1.5-1.8
Celeris	18.40%	15.50%	25.40%	27.60%	10.70%	1.70%
Sitio 9	0.50%	16.30%	47.50%	31.60%	3.10%	0.70%
Diferencia	17.90%	0.80%	22.10%	4.00%	7.60%	1.00%

Tabla 13: Comparación de ocurrencias en intervalos, SWASH y registros sitio 9.

Fuente: Elaboración propia.

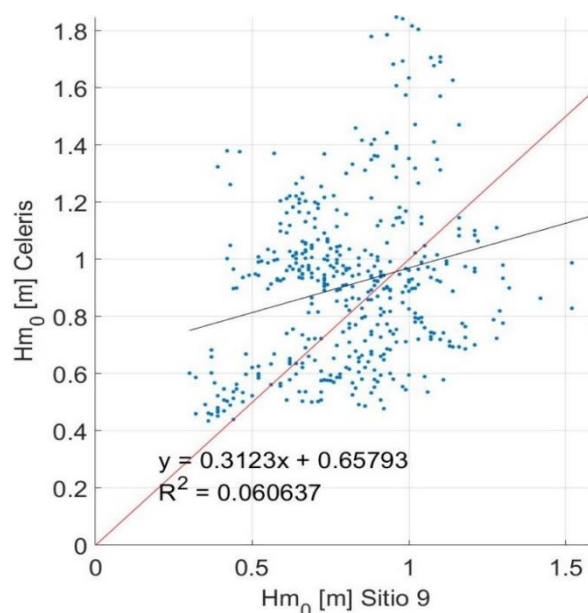


Ilustración 56: Correlación entre modelo Celeris y datos sitio 9

Fuente: Elaboración propia

El histograma combinado dejó en evidencia la diferencia entre los datos modelados versus los obtenidos del registro. Cómo se presenta en la Ilustración 55, los resultados del modelo fueron mucho más bajos.

La correlación entre los datos del sitio 9 y los datos obtenidos de la modelación, muestran que los resultados no fueron representativos. La pendiente obtenida de la recta de regresión es de 0.31, mientras que el coeficiente R^2 es de 0.06, con un error medio cuadrático de 0.11, lo que expone que los resultados obtenidos por el modelo no se aproximaron a los registros del sitio 9. La covarianza fue de 0.053, lo que indicó que no hubo una relación directa ni inversa entre los datos. Mientras que el sesgo fue de 0.1414, por lo que en el caso de Celeris los datos se concentraron cerca del valor promedio, lo que fue consecuente con el histograma en la Ilustración 55.

7 DISCUSIONES

En este capítulo se discuten los resultados que se obtuvieron con las modelaciones, así como también de las ventajas y desventajas entre cada modelo, tanto en el ámbito de ecuaciones de gobierno como de funcionamiento e implementación.

Para realizar estas comparaciones se tomó como base el experimento realizado por Lynett et al. (2002). Al replicar el experimento se utilizaron modelos que resuelven las ecuaciones no lineales de aguas someras y las ecuaciones de Boussinesq. A partir de este análisis, se desprendieron varias conclusiones de utilidad para entender algunas diferencias entre los resultados de cada modelo.

La modelación a escala real, se utilizó para analizar la sensibilidad de ambos modelos a distintos períodos de oleaje (6 [s], 11 [s] y 17 [s]), lo que se pudo extraer por medio de los coeficientes de asomeramiento.

En la modelación del puerto de San Antonio, se integró lo desprendido de los otros casos modelados (como, por ejemplo, la reflexión que se produce en los bordes tierra-agua con Celeris, o algunas variaciones en las desnivelaciones que tuvo SWASH con las distintas profundidades del puerto), con el objetivo de comprender las potencialidades de ambos modelos en un caso real.

7.1 MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

Para el experimento de Lynett et al. (2002), SWASH fue capaz de obtener resultados similares a los experimentales, tanto en lo que fue run-up, run-down, movimiento de la línea de costa y desnivelaciones en todo el dominio de cálculo.

Con Celeris, los resultados no fueron representativos del experimento, como se muestra en la Ilustración 23c e Ilustración 24c. Esto debido a diversos factores, entre los cuales se encuentran las ecuaciones de gobierno, que al ser débilmente dispersivas en sectores cercanos a la costa balancean los procesos no lineales. Otro factor a considerar fue como resuelve la fricción de fondo el modelo.

Respecto a las modelaciones con variación de la pendiente, utilizando SWASH disminuyó el run-up y run-down conforme la pendiente aumentó.

Celeris por su parte, no desarrolló el run-up completamente, la distancia máxima vertical que alcanzó con una pendiente 0.13, fue casi igual a la conseguida en la modelación del experimento de Lynett et al. (2002) con una pendiente de 0.04.

7.2 MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL

Las modelaciones realizadas en la batimetría ideal a escala real, mostraron que los coeficientes de agitación de ambos modelos no fueron semejantes. Las variaciones se debieron al tipo de ecuaciones que resuelven SWASH y Celeris, las consideraciones que posee cada modelo, la forma en que la paleta generó el oleaje y la implementación numérica.

Los coeficientes de agitación obtenidos con SWASH, presentaron valores relativamente constantes entre $x = 0$ y $x = 100$, no hubo peaks importantes en ese tramo. Sin embargo, al llegar al tramo con pendiente que comprendió desde $x = 100$ hasta $x = 200$, los coeficientes de agitación aumentaron bruscamente, en ese tramo fue en donde los fenómenos no lineales dominaron y se desarrollaron.

Celeris, sin embargo, mostró grandes diferencias en los coeficientes de agitación en toda la batimetría. En el primer caso con un período de 6 [s], se generó un incremento en los coeficientes en el sector cercano a la paleta generadora. Las ecuaciones de Boussinesq en los términos dispersivos contienen la profundidad como variable al cuadrado y al cubo, lo que hace muy sensible al modelo a profundidades bajas.

Fue posible observar en la Ilustración 37, que el coeficiente mayor se generó al borde de la paleta generadora, con un valor cercano a 1.2, y posterior a eso comenzó a disminuir hasta llegar a un coeficiente de 1, el cual fue mucho menor que el obtenido en SWASH.

En la Ilustración 38, se mostró el caso de los 11 [s], donde los coeficientes se asemejan en la mayoría del dominio hasta la zona donde comienza la playa.

Con un período de 17 [s], la longitud de onda fue de aproximadamente 219 [m]. Como se mostró en la Ilustración 39, alcanzaron a desarrollarse dos zonas donde la superposición de ondas reflejada e incidente aumentaron con SWASH, mientras que con Celeris tuvo un comportamiento continuo con un coeficiente de agitación relativamente constante.

Es relevante destacar que al aumentar el período de las olas y no poseer una porosidad en ninguno de los modelos, se generaron olas reflejadas, por lo que se marcaron las crestas y valles de manera más acentuada.

En base al experimento de Lynett et al. (2002), se concluye que, en sectores muy cercanos a la costa, la opción sería utilizar modelos que resuelvan las NSWE como SWASH. Asimismo, el modelo que representó de mejor forma las distintas pendientes fue SWASH.

7.3 MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

Los resultados de los modelos, comparándolos con los datos obtenidos en el sitio 9, no fueron muy representativos.

Los datos a los que se tuvo acceso fueron de sólo dos años en el nodo donde se encontraba el ADCP en la entrada de la dársena, mientras que los datos que se obtuvieron del sitio 9, solamente fueron de dos meses, con lo que no se contó con un registro extenso de climas de oleaje ni de sistemas de oleaje estacional.

El análisis que se realizó fue estadístico, por medio de histogramas, curvas de excedencia, tablas de incidencia y correlaciones.

El modelo SWASH, se comportó de manera más exacta en lo que fueron aguas someras y zonas cercanas a la costa. El experimento realizado en el capítulo 6.1, demostró que el modelo representa de buena manera problemas en esas profundidades relativas.

Celeris por su parte, no se comportó bien en zonas donde las profundidades fueron muy pequeñas como en las playas (secciones 6.1 y 6.2).

La batimetría de San Antonio es muy peculiar; al tener un gran cañón en la entrada del puerto (Ilustración 11) donde la profundidad máxima en el modelo fue de aproximadamente 105 [m]. Con esta geometría el cambio de profundidades relativas es grande.

Al ser un modelo no lineal, SWASH resuelve la ecuación de conservación de la masa y las dos ecuaciones de momentum sin términos dispersivos. Este modelo fue creado esencialmente como una herramienta eficiente y robusta para resolver problemas en zonas de aguas someras hasta la costa. Puesto que la batimetría de San Antonio posee grandes profundidades, el modelo tuvo que resolver el problema para todas las profundidades relativas. Esto sumado a las consideraciones expuestas en la sección 5.3, explica porque hubo diferencias entre las alturas de SWASH y los datos reales del sitio 9. Sin embargo, estas fueron las más exactas.

Al ser un modelo Boussinesq, Celeris resuelve las ecuaciones de momentum con términos dispersivos, que lo hacen más apropiado para solucionar problemas en donde hay mayores cambios en las profundidades relativas.

7.3.1 DIRECCIONES

Si bien las direcciones obtenidas con la modelación con SWASH (Ilustración 48), no fueron iguales a las registradas en el sitio 9, se pudo obtener una dirección de incidencia WSW, pese a que las direcciones con las cuales se realizó la modelación fueron W y WNW, lo que indicó que se representa de cierta manera esa dirección.

Por su parte, Celeris tuvo un mayor rango de direcciones, las que fueron desde el WSW hasta el NW (Ilustración 53), lo que indica que existió una mayor distribución de la energía en las direcciones. Existieron además algunos estados de mar provenientes del SW, sin embargo, estas direcciones se desviaron de los registros obtenidos en el sitio 9, ya que no existen direcciones mayores al W.

El problema con las direcciones se debió principalmente a la poca información que se poseyó, tanto en las calibraciones como en el registro del sitio 9. En los datos propagados desde aguas profundas, las direcciones predominantes fueron W y WNW, por lo que sólo se utilizaron esas direcciones principales para las calibraciones, y posteriormente las modelaciones. Otro punto a considerar, fue que el tiempo que se registraron datos en el sitio 9 fue tan solo de junio a julio del 2010, lo que corresponde a un mes y medio. Estos datos representaron tan solo un 3.92% de los totales que se tenían para la modelación, por lo que en direcciones no se tuvo toda la información necesaria para comparaciones de buena calidad.

7.3.2 PERÍODOS

Los períodos no se vieron bien representados por ninguno de los modelos, lo que se debió a un problema con la resolución de las mallas de cálculo. Para propagar espectros con frecuencias muy altas se necesitan mallas de cálculo muy finas, de lo contrario los modelos se vuelven inestables y se caen. Todos los espectros que se propagaron se encontraban por encima de los 7 [s] de período, ya que, bajo eso, los modelos presentaban inestabilidad.

No se decidió continuar con el proceso de disminuir la resolución de la malla de cálculo, debido a que los tiempos necesarios para resolver cada caso se extendían considerablemente. De acuerdo al criterio de estabilidad definido por Courant, mientras menor sea la resolución de la malla también lo deberá ser el paso de tiempo; por lo tanto, a menor paso de tiempo mayor tiempo se requiere para resolver cada caso.

7.3.3 ALTURAS

Los registros del sitio 9 mostraron que las alturas estuvieron entre los 0.27 [m] hasta los 1.6 [m], donde las más frecuentes se encontraron entre los 0.5 [m] y los 1.5 [m]. Con estos valores como referencia, se analizaron los resultados obtenidos por ambos modelos.

Al realizar la comparación de las alturas significativas del sitio 9 con las obtenidas con SWASH, se observó que los intervalos de las frecuencias de ocurrencia fueron similares, tanto en los valores menores como mayores, siendo 0.4 [m] el más bajo y 1.2 [m] el más alto, lo que corresponde al 92.4% de la frecuencia de ocurrencia. Como se mostró en la sección 6.3.2, los resultados fueron claros, SWASH fue capaz de representar las alturas de forma más precisa, fue posible observar esto en la Ilustración 50.

En lo que respecta a Celeris, las alturas también se aproximaron a los registros del sitio 9, acumulando la mayor frecuencia de ocurrencia (83.88%) entre los 0.25 [m] a los 1.5 [m]. Un punto a considerar fueron las alturas bajo los 0.25 [m], que acumularon el 13.94% de ocurrencia, lo cual se debió a algunos problemas de inestabilidad en las líneas de costa; estos valores están en los registros, pero pueden desestimarse.

Las correlaciones mostraron que ninguno de los modelos pudo ajustarse correctamente a los registros del sitio 9. Sin embargo, se observó que el que mejor representó las características del lugar fue SWASH, presentando un error medio cuadrático asociado menor que el de Celeris. En cuanto al coeficiente R^2 siguieron el mismo comportamiento, los valores bajos de R^2 exhibieron que ambos modelos estuvieron lejos de reproducir los datos reales del sitio. No obstante, SWASH de igual manera tuvo un coeficiente de 0.15, lo cual fue pésimo, pero mejor que el de Celeris (0.06).

La poca exactitud y precisión de los resultados, fueron producto de la baja cantidad de datos y de las muchas consideraciones que se tuvieron que tomar para que ambos modelos fueran capaces de resolver el mismo problema.

7.3.4 OTROS TEMAS

Es importante mencionar problemas por algunas incompatibilidades entre los modelos.

SWASH es un modelo con muchas características, con gran cantidad de herramientas y configuraciones. Es un modelo creado para resolver la mayor cantidad de problemas costeros de manera eficiente, por lo que se pueden utilizar opciones que representen de la mejor manera un problema en particular.

Celeris en cambio es un modelo relativamente nuevo, creado para resolver los problemas de manera rápida. No posee una gran cantidad de configuraciones, por lo que es un tanto limitado. Este modelo aún se encuentra en constantes cambios y cada cierto tiempo recibe actualizaciones que mejoran su desempeño, así como también agregan nuevas características.

Al no tener las mismas herramientas, en cada uno se debió buscar soluciones para compatibilizar las modelaciones y que ambos resolvieran aproximadamente el mismo problema.

Una de las ventajas que poseen ambos modelos es que son de código abierto, son gratuitos y ambos de muy buena calidad. El inconveniente que esto trae, es que los modelos solamente entregan planillas de resultados, por lo que el usuario debe desarrollar sus propias herramientas para visualizar y obtener las soluciones.

8 CONCLUSIONES

El objetivo fundamental de esta memoria, fue abordar el problema sobre qué modelo representaba de mejor manera las condiciones de oleaje que posee el puerto de San Antonio.

El aporte principal del trabajo consistió en comparar dos tipos de modelos que resuelven de manera semejante el problema, haciendo uso de ecuaciones de gobierno para realizar la modelación costera. En esta memoria, el foco no fue sólo como cada modelo fue capaz de modelar el puerto de San Antonio, sino que también cómo se comportaban en condiciones ideales variando sólo algunos parámetros. Finalmente haciendo uso de las modelaciones ideales y reales se concluyó en qué condiciones cada modelo representaba mejor el sector a estudiar.

Se demostró que existen diferencias en los resultados, esto considerando que resuelven ecuaciones levemente distintas. Sin embargo, fue necesario cuantificarlo con experimentos ya realizados en otras publicaciones, para estimar en qué nivel se encontraban estas diferencias.

En la batimetría ideal a escala real, los modelos NSWE como SWASH, funcionan de una manera excepcional en zonas costeras, incluso siendo capaz de representar fenómenos como el run-up, run-down y la reflexión. Celeris al ser un modelo Boussinesq, no fue capaz de resolver los problemas del run-up y run-down en la playa, por lo que se tuvieron algunos problemas con la reflexión de olas pequeñas. En base a los experimentos ideales realizados cerca de la playa, y después de haber analizado ambos modelos, sus ecuaciones de gobierno, sus consideraciones, ventajas, desventajas y sus resultados, se concluye que el modelo que mejor resolvió los problemas costeros cercanos a la playa es SWASH, en todos los casos analizados.

En el caso del puerto de San Antonio, donde la batimetría es especial por el cañón que se encuentra en la bocana de acceso al puerto, SWASH presentó una mayor semejanza en las alturas de ola respecto a los registros del sitio 9. Celeris en cambio no consiguió alturas que se aproximen a los datos registrados. El modelo posee algunos problemas de estabilidad en las intersecciones tierra-agua en la malla de cálculo, por lo que pudo haber generado olas reflejadas en otras direcciones.

Según lo mostrado en las tablas de incidencia, ilustraciones, gráficos y correlaciones, finalmente se concluye que el modelo que mejor representa las características del puerto de San Antonio es SWASH.

Como cierre al inconveniente de las direcciones de Celeris, se concluye que el modelo está aún en fase de desarrollo temprano, por lo que en futuros lanzamientos puede solucionar los problemas que se presentaron en este trabajo.

REFERENCIAS

- Department of the Army, U. A. (1984). *Shore Protection Manual*.
- Durran, D. (1990). The third-order Adams-Bashforth Method: An Attractive alternative to Leap Frog Time Differencing. *Monthly weather review*, 702-720.
- Gobierno de Chile. (2020). *GOB*. Retrieved from <https://www.gob.cl/nuestro-pais/>
- Green, G. (1837). Se desconoce el nombre de la publicación y de quién llamó al primer resultado de Green ley de Green. 457.
- Guisado Pintado, E., Malvárez García, G., & Navas Concha, F. (2010). Los modelos de propagación de oleaje, simulación morfodinamica y las TIG. *Tecnologías de la Información Geográfica*.
- GUZMAN MARDONES, C. (2006). *PUESTA EN MARCHA DE CANAL CON GENERADOR DE OLAS Y CARACTERIZACION HIDRODINAMICA*.
- Kurganov, A., & G., P. (2007). A Second-Order Well-Balanced Positivity Preserving Central-Upwind Scheme for the Saint-Venant System. *Communications in Mathematical Sciences*, 133-160.
- Liu, Z., & Frigaard, P. (2001). *Generation and analysis of random waves*.
- Lynett, P. J., Wu, T.-R., & Liu, P. L.-F. (2002). Modeling wave runup with depth-integrated equations. *ELSEVIER*, 89-107.
- Madsen, P., & Sørensen, O. (1992). A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2 A slowly-Varying bathymetry. *Elsevier*, 183-204.
- Madsen, P., Sørensen, O., & Schäffer, H. (1997). Surf zone dynamics simulated by a Boussinesq type. *ELSEVIER*, 255-287.
- MathWorks. (2014, Mayo 28). Retrieved from <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25982-okada--surface-deformation-due-to-a-finite-rectangular-source?requestedDomain=www.mathworks.com>
- Peregrine, D. H. (1967). *Long waves on a beach*. *Journal of Fluid Mechanics*.
- R.O.M. Ministerio de Transportes, España. (2012). *Recomendaciones de obras Marítimas*.
- SHOA. (2017, Mayo 30). *SHOA*. Retrieved from <http://www.shoa.cl/servicios/citsu/citsu.html>
- Silva Casarín, R. (2005). *Analisis y descripción estadística del oleaje*.
- Stelling, G., & Zijlema, M. (2003). An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, 1-23.

- Tavakkol, S., & Lynett, P. (2017). Celeris: A GPU-accelerated open source software with a Boussinesq-type wave solver for real-time interactive simulation and visualization. *ELSEVIER*.
- Universidad de Cantabria. (2000). *Documento de referencia, Vol. 1 Dinámicas*.
- Wei, G., & Kirby, J. (1995). Time-Dependent Numerical Code for Extended Boussinesq Equations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 251-261.
- Winckler Grez, P. (2017). *Modelado de procesos costeros*.
- Zijlema, M., Stelling, G., & Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly. *ELSEVIER*, 992-1012.

ANEXOS

A. DERIVACIÓN SIMPLIFICADA DE LAS ECUACIONES NO LINEALES DE AGUAS SOMERAS

Se realizará una derivación relativamente estandarizada de las NSWs según (Winckler Grez, 2017).

Estas ecuaciones se derivan a partir de la integración en la vertical de las ecuaciones de conservación de la masa y momento para un flujo incompresible e irrotacional.

Por simplicidad, las ecuaciones fundamentales se muestran en dos dimensiones en el plano vertical.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (A)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (B)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(wu) + \frac{\partial}{\partial z}(w^2) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (C)$$

Para integrar las ecuaciones (B) y (C) en la vertical y reducir el problema de tres a dos dimensiones, es necesario introducir condiciones de borde en el fondo y la superficie. La condición para el fondo ($z = -h(x)$) será.

$$w = -u \frac{\partial h}{\partial x} \quad (D)$$

Mientras que la condición para superficie ($z = \eta(x, t)$) será

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (E)$$

Tras introducir las condiciones de borde, se integra la ecuación de conservación de la masa (A) entre el fondo y la superficie, se aplica la regla de Leibniz, el teorema fundamental del cálculo y las condiciones de borde para obtener la siguiente ecuación.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}([d + \eta]\bar{u}) = 0 \quad (F)$$

Para la ecuación de momentum (B) se procede de manera similar, con lo que se obtiene la expresión

$$\frac{\partial}{\partial t}([d + \eta]\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}([d + \eta]\overline{uu}) = -\frac{1}{\rho} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} dz \quad (G)$$

Para eliminar la presión p del sistema, se recurre a la ecuación de conservación de momentum en la vertical (C) haciendo el supuesto de que las aceleraciones verticales son mucho menores a la gravedad:

$$\left\| \frac{dw}{dt} \right\| = \left\| \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(wu) + \frac{\partial}{\partial z}(w^2) \right\| \ll \|-g\| \quad (\text{H})$$

Este supuesto es quizá el más potente de las ecuaciones lineales de onda larga. Implica que las ondas son no dispersivas, por lo que las ondas se propagan con la misma celeridad. El supuesto anterior permite reducir la expresión (C) a

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (\text{I})$$

Si se descarta la presión atmosférica la ecuación (G) se expresa finalmente como

$$\frac{\partial}{\partial t}([h + \eta]\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}([h + \eta]\bar{u}^2) = -g[h + \eta] \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (\text{J})$$

Las ecuaciones (G) y (J) corresponden a las ecuaciones no lineales de aguas someras en su forma simplificada para una dimensión, en ellas no se encuentran los términos asociados a la fricción de fondo ni los términos de estrés turbulento vertical.

B. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA SWASH

Para la integración temporal se utilizó un esquema de salto de rana explícito junto con un paso de tiempo explícito de segundo orden para la advección, se utiliza un paso de tiempo explícito de primero orden para el término de viscosidad y un paso de tiempo implícito de primero orden para la parte no hidrostática. La velocidad u se evalúa en un paso medio de tiempo $(n + 1/2) \Delta t$, mientras que la elevación de la superficie en un paso de tiempo completo $(n + 1) \Delta t$, con Δt el paso de tiempo y n indica el nivel de tiempo $t^n = n\Delta t$. Esta variante del esquema de salto de rana comparte con el esquema clásico ventajas de precisión de segundo orden en el tiempo y sin atenuación de las olas. Además, requiere menos almacenamiento y hace que el algoritmo sea fácil de implementar.

Se comienza con una discretización del momentum ecuación (16) como sigue,

$$\begin{aligned}
& \frac{u_{i+1/2}^{n+1/2} - u_{i+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} + u_{i+1/2}^{n-1/2} (L_x u)_{i+1/2}^{n-1/2} + g \frac{\eta_{i+1}^n - \eta_i^n}{\Delta x} + \frac{q_{b+1}^{n+1} - q_{b,i}^{n+1}}{2\Delta x} \\
& + \frac{(\bar{q}_{b,i+1/2}^x)^{n+1}}{(\bar{h}_{i+1/2}^x)^{n+1}} \frac{\eta_{i+1}^n - \eta_i^n - d_{i+1} + d_i}{2\Delta x} + c_f \frac{u_{i+1/2}^{n+1/2} |u_{i+1/2}^{n-1/2}|}{(\bar{h}_{i+1/2}^x)^n} \\
& = \frac{v_{t,j} + 1h_{i+1}^n (u_{i+3/2}^{n-1/2} - u_{i+1/2}^{n-1/2}) - v_{t,i} h_i^n (u_{i+1/2}^{n-1/2} - u_{i-1/2}^{n-1/2})}{(\bar{h}_{i+1/2}^x)^n \Delta x^2}
\end{aligned} \tag{K}$$

Se debe tener presente que el término de fricción inferior se aproxima implícitamente para mejorar la robustez del modelo. La notación barra se utiliza para denotar promedios, por ejemplo: $\bar{\eta}$

$$\bar{h}_{i+1/2}^x = \frac{1}{2} (h_i + h_{i+1}) \tag{L}$$

A continuación, se presenta la discretización de la ecuación de conservación de la masa

$$\frac{\eta_i^{n+1} - \eta_i^n}{\Delta t} + \frac{\hat{h}_{i+1/2}^n u_{i+1/2}^{n+1/2} - \hat{h}_{i-1/2}^n u_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0 \tag{M}$$

Se debe tener en cuenta que el paso de tiempo explícito se lleva a cabo mediante la resolución de la ecuación (19) antes de la ecuación (21). La profundidad del agua $\hat{h}_{i+1/2}$ no está definida de forma única. Una aproximación apropiada se basa en el primer orden del esquema upwind y está dada por

$$\hat{h}_{i+1/2} = \begin{cases} \eta_i + \min(d_i, d_{i+1}), & \text{if } u_{i+1/2} > 0 \\ \eta_{i+1} + \min(d_i, d_{i+1}), & \text{if } u_{i+1/2} < 0 \\ \max(\eta_i, \eta_{i+1}) + \min(d_i, d_{i+1}), & \text{if } u_{i+1/2} = 0 \end{cases} \tag{N}$$

Basado en esta expresión, se puede mostrar que si el paso de tiempo se elige de tal manera que $\Delta t |u_{i+1/2}^{n+1/2}| / \Delta x \leq 1$ en cada paso de tiempo, entonces la profundidad del agua h_i^{n+1} no es negativo en cada paso de tiempo (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011). Por lo tanto, la inundación nunca ocurre más rápido que un tamaño de cuadrícula por paso de tiempo, lo que es físicamente correcto. Esto implica que el cálculo de las áreas secas no necesita ninguna característica especial. Por esta razón, no se requieren procedimientos complicados de secado o inundación. Para la eficiencia computacional, la ecuación de momentum (16) no se resuelve y la velocidad u se establece en cero si la profundidad de agua $\hat{h}_{i+1/2}$ está por debajo de un valor umbral que este caso será 0.05 [mm]. Para lograr una precisión de segundo orden en el espacio para la aproximación de $\hat{h}_{i+1/2} = 2$, se agregó una interpolación de orden superior aumentada con un limitador de flujo.

$$\hat{h}_{i+1/2} \leftarrow \hat{h}_{i+1/2} + \begin{cases} \frac{1}{2}\Psi(r_{i+1/2}^+)(\eta_i - \eta_{i-1}), & \text{if } u_{i+1/2} > 0 \\ \frac{1}{2}\Psi(r_{i+1/2}^-)(\eta_{i+1} - \eta_{i+2}), & \text{if } u_{i+1/2} < 0 \end{cases} \quad (\tilde{N})$$

Donde:

$$r_{i+1/2}^+ = \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\eta_i - \eta_{i-1}}, r_{i+1/2}^- = \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\eta_{i+2} - \eta_{i+1}}, \quad (O)$$

Son las relaciones contra el viento de los gradientes consecutivos de la elevación de la superficie, y $\Psi(r)$ es el limitador de flujo para evitar oscilaciones no deseadas cerca de los gradientes agudos. Está dado por

$$\Psi(r) = \max \left[0, \min \left(2, \frac{1}{2}r + \frac{1}{2}, 2r \right) \right], \quad (P)$$

que se ha encontrado para obtener los mejores resultados.

La forma en que se emplea la ecuación de conservación de momentum (16) es no conservativa, por lo tanto, en principio no puede conservarse el momento. Para obtener una buena precisión y eficiencia se utiliza un esquema escalonado, En (Stelling & Zijlema, 2003) se propone un esquema conservador de momentum que es aplicable para cuadrículas escalonadas. La ventaja obtenida es que este esquema eficiente es capaz de manejar flujos con una amplia gama de números de Froude. Además, en el contexto de la simulación dinámica de olas, garantiza que las propiedades de la ola en la rotura se modelan correctamente. La manera en que se logra la conservación del momento es una faceta clave de una implementación exitosa de la ecuación de momentum en la red escalonada. Esto se expone a continuación con cierto detalle.

Se utiliza la siguiente identidad:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(\phi u)}{\partial x} - u \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (Q)$$

Con $\phi \equiv hu$ la descarga. Una aproximación apropiada para esta cantidad es

$$\phi_{i+1/2} = \hat{h}_{i+1/2} u_{i+1/2} \quad (R)$$

Un esquema de advección de conservación de momentum está dado por

$$u_{i+1/2}(L_x u)_{i+1/2} = \frac{1}{\bar{h}_{i+1/2}^x} \left(\frac{\bar{\phi}_{i+1}^x \hat{u}_{i+1} - \bar{\phi}_i^x \hat{u}_i}{\Delta x} - u_{i+1/2} \frac{\bar{\phi}_{i+1}^x - \bar{\phi}_i^x}{\Delta x} \right) \quad (S)$$

Para mantener la precisión de segundo orden en el tiempo, este esquema se combina con la conocida técnica de corrección-predicción de MacCormack, que incluye dos pasos en cada paso de tiempo. En el paso predictor ecuación (19) es reemplazado por

$$\frac{u_{i+1/2}^* - u_{i+1/2}^{n-1/2}}{\Delta t} + u_{i+1/2}^{n-1/2} (L_x u)_{i+1/2}^{n-1/2} + \dots + c_f \frac{u_{i+1/2}^* |u_{i+1/2}^{n-1/2}|}{(\bar{h}_{i+1/2}^x)^n} = \dots \quad (T)$$

Para obtener el valor intermedio de u^* . En este paso, el esquema de primer orden avanzado es usado para aproximar $\hat{u}$ al punto i :

$$\hat{u}_i = \begin{cases} u_{i-1/2}, & \text{si } \bar{\phi}_i^x \geq 0 \\ u_{i+1/2}, & \text{si } \bar{\phi}_i^x < 0 \end{cases} \quad (U)$$

En el paso del corrector, el valor predicho u^* es correcto de acuerdo con

$$u_{i+1/2}^{n+1/2} = u_{i+1/2}^* - \frac{\Delta t}{(\bar{h}_{i+1/2}^x)^n} \left(\frac{((\bar{\phi}_{i+1}^x)^{n-1/2} \Delta u_{i+1} - (\bar{\phi}_i^x)^{n-1/2} \Delta u_i)}{\Delta x} \right) \quad (V)$$

Con

$$\Delta u_i = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(u_{i-\frac{1}{2}}^* - u_{i-\frac{3}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \right), & \text{si } (\bar{\phi}_i^x)^{n-\frac{1}{2}} \geq 0 \\ \frac{1}{2} \left(u_{i+\frac{1}{2}}^{n-1/2} - u_{i+\frac{3}{2}}^* \right), & \text{si } (\bar{\phi}_i^x)^{n-\frac{1}{2}} < 0 \end{cases} \quad (W)$$

Con esta corrección de segundo orden, se obtiene el esquema de diferencia retardado de segundo orden (BDF) de un lado. Este esquema genera una cantidad limitada de disipación numérica que es suficiente para evitar ondas con una longitud de $2\Delta x$ de manera efectiva. La integración de tiempo es explícita y, por lo tanto, requiere un estricto cumplimiento de los criterios de estabilidad para una solución estable. La condición CFL conocida está dada por

$$Cr = \frac{\Delta t \left(\sqrt{g(\bar{h}_{i+1/2}^x)^{n+1}} + |u_{i+1/2}^{n+1/2}| \right)}{\Delta x} \leq 1 \quad (X)$$

Con el número de Courant (Cr) evaluado en el punto de velocidad. Un paso de tiempo ajustado dinámicamente controlado por el número de Courant fue implementado en SWASH de la siguiente manera. Se determinó el máximo número real de Courant sobre todos los puntos de malla mojada. El intervalo de tiempo se reduce a la mitad cuando este número se hace más grande que una constante predeterminada $Cr_{max} < 1$, y el paso de tiempo se duplica cuando este número es más pequeño que otro Cr_{min} constante, que es lo suficientemente pequeño como para asegurar que el intervalo de tiempo se pueda

duplicar. En todos los cálculos numéricos presentados, Cr_{min} se establece en 0.1, mientras que el número máximo de Courant Cr_{max} se especificará de manera diferente para diferentes casos.

C. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA CELERIS

$$U^* = P - \frac{1}{3}dd_xP_x - \left(B + \frac{1}{3}\right)d^2P_{xx} \quad (Y)$$

$$V^* = Q - \frac{1}{3}dd_yQ_y - \left(B + \frac{1}{3}\right)d^2Q_{yy} \quad (Z)$$

$$E(P, Q) = -(P_x + Q_y) \quad (AA)$$

$$F(h, P, Q) = -\left(\frac{P^2}{h} + \frac{gh^2}{2}\right)_x - \left(\frac{PQ}{h}\right)_y - ghz_x - f_1 + Bgd^3(\eta_{xx} + \eta_{yy}) + Bgd^2(d_x(2\eta_{xx} + \eta_{yy}) + d_y\eta_{xy}) \quad (AB)$$

$$G(h, P, Q) = -\left(\frac{Q^2}{h} + \frac{gh^2}{2}\right)_y - \left(\frac{PQ}{h}\right)_x - ghz_y - f_2 + Bgd^3(\eta_{yy} + \eta_{xx}) + Bgd^2(d_y(2\eta_{yy} + \eta_{xx}) + d_x\eta_{xy}) \quad (AC)$$

$$F^*(Q) = \frac{1}{6}dd_xQ_y + \frac{1}{6}dd_yQ_x + \left(B + \frac{1}{3}\right)d^2Q_{xy} \quad (AD)$$

$$G^*(Q) = \frac{1}{6}dd_xP_y + \frac{1}{6}dd_yP_x + \left(B + \frac{1}{3}\right)d^2P_{xy} \quad (AE)$$

El paso de predicción se lee como

$$w_{ij}^{n+1} = w_{ij}^n + \frac{\Delta t}{12}(23E_{ij}^n - 16E_{ij}^{n-1} + 5E_{ij}^{n-2}) \quad (AF)$$

$$U_{ij}^{*n+1} = U_{ij}^{*n} + \frac{\Delta t}{12}(23F_{ij}^n - 16F_{ij}^{n-1} + 5F_{ij}^{n-2}) + 2F_{ij}^{*n} - 3F_{ij}^{*n-1} + F_{ij}^{*n-2} \quad (AG)$$

$$V_{ij}^{*n+1} = V_{ij}^{*n} + \frac{\Delta t}{12}(23G_{ij}^n - 16G_{ij}^{n-1} + 5G_{ij}^{n-2}) + 2G_{ij}^{*n} - 3G_{ij}^{*n-1} + G_{ij}^{*n-2} \quad (AH)$$

Donde los índices superiores denotan el número de paso en el tiempo, siendo n el último paso con variables conocidas. El paso del predictor es explícito en el tiempo, lo que significa que todas las variables en el lado derecho de las ecuaciones son conocidas. El paso corrector es realizado por

$$w_{ij}^{n+1} = w_{ij}^n + \frac{\Delta t}{24} (9E_{ij}^{n+1} + 19E_{ij}^n - 5E_{ij}^{n-1} + E_{ij}^{n-2}) \quad (\text{AI})$$

$$U_{ij}^{*n+1} = U_{ij}^{*n} + \frac{\Delta t}{24} (9F_{ij}^{n+1} + 19F_{ij}^n - 5F_{ij}^{n-1} + F_{ij}^{n-2}) + F_{ij}^{*p} - F_{ij}^{*n} \quad (\text{AJ})$$

$$V_{ij}^{*n+1} = V_{ij}^{*n} + \frac{\Delta t}{24} (9G_{ij}^{n+1} + 19G_{ij}^n - 5G_{ij}^{n-1} + G_{ij}^{n-2}) + G_{ij}^{*p} - G_{ij}^{*n} \quad (\text{AK})$$

El paso del corrector está implícito en el tiempo. Para resolverlo, los términos $n + 1$ se calculan por el paso del predictor (o los valores correctores de la iteración del corrector anterior), luego el paso del corrector se itera un número predefinido de veces, o hasta que las variables convergen. Como las variables de los pasos de tiempo anteriores no están definidas en los primeros dos pasos de tiempo de la simulación (es decir, $n = 1$ y $n = 2$), se utiliza una integración de tiempo de Euler de primer orden para esos dos pasos

La elevación de la superficie del agua, w_{n+1} , se encuentra directamente al resolver las ecuaciones (Y) o (AB). Sin embargo, para calcular los términos de flujo, P^{n+1} y Q^{n+1} se debe resolver el siguiente conjunto de ecuaciones implícitas:

$$A_{ij}^x P_{i-1,j} + B_{ij}^x P_{ij} + C_{ij}^x P_{i+1,j} = U_{ij}^* \quad (\text{AL})$$

$$A_{ij}^y Q_{i,j-1} + B_{ij}^y Q_{ij} + C_{ij}^y Q_{i,j+1} = V_{ij}^* \quad (\text{AM})$$

Donde

$$A^\alpha = \frac{dd_\alpha}{6\Delta\alpha} - \left(B + \frac{1}{3}\right) \frac{d^2}{\Delta\alpha^2} \quad (\text{AN})$$

$$B^\alpha = 1 + 2 \left(B + \frac{1}{3}\right) \frac{d^2}{\Delta\alpha^2} \quad (\text{AO})$$

$$C^\alpha = -\frac{dd_\alpha}{6\Delta\alpha} - \left(B + \frac{1}{3}\right) \frac{d^2}{\Delta\alpha^2} \quad (\text{AP})$$

Las ecuaciones (AE) y (AF), dan como resultado un sistema tridiagonal de ecuaciones para cada fila/columna de celdas en la dirección x/y. Para resolver de manera eficiente estos conjuntos de ecuaciones en la GPU, se utiliza el método de reducción cíclica (CR)

La parte más desafiante de la implementación es resolver los sistemas de matrices tridiagonales dentro del esquema numérico. El algoritmo clásico para resolver tal sistema es el algoritmo de Thomas que consiste en una eliminación hacia adelante y una sustitución hacia atrás. Sin embargo, este algoritmo es inherentemente serial. El empleo de un algoritmo de este tipo generalmente necesitará copiar los datos de la GPU a la memoria principal, ejecutar el solucionador en serie y volver a copiar los resultados en la GPU. Dicho proceso aumentará significativamente el tiempo de ejecución del software y se convertirá en el cuello de botella para dominios grandes. En Celeris, la solución del sistema tridiagonal se realiza mediante el algoritmo de reducción cíclica (CR), el cual consta de dos fases: reducción hacia adelante y sustitución hacia atrás. En la fase de reducción hacia adelante, el sistema se reduce sucesivamente a un sistema más pequeño con la mitad del número de incógnitas, hasta que se logra un sistema de dos incógnitas que se puede resolver de forma trivial. En la fase de sustitución hacia atrás, la otra mitad de las incógnitas se

encuentran sustituyendo los valores encontrados previamente en las ecuaciones. Este proceso se ilustra en la siguiente figura.

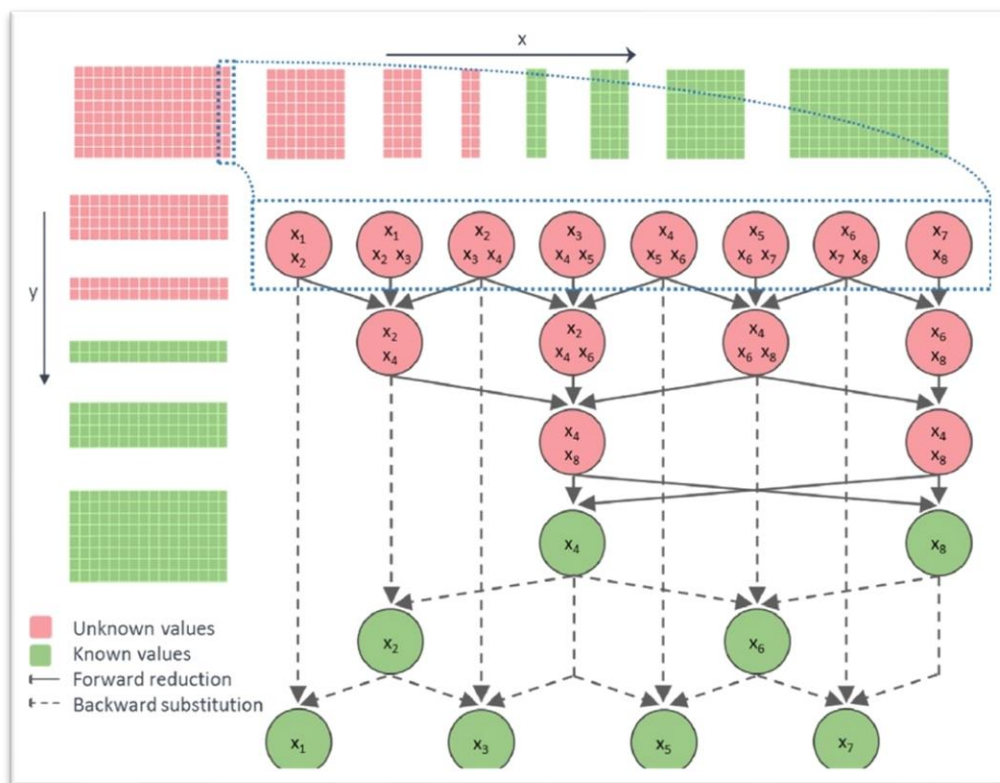


Ilustración 57: Algoritmo de reducción cíclica y su implementación en la GPU

Fuente: (Tavakkol & Lynett, 2017)

D. CLIMA MEDIO DE OLEAJE

1.D.1 DATOS PROPAGADOS

En la Ilustración 58 e Ilustración 59, se presenta el histograma junto con el gráfico de no excedencia para los datos propagados desde el año 1990 hasta el 2018.

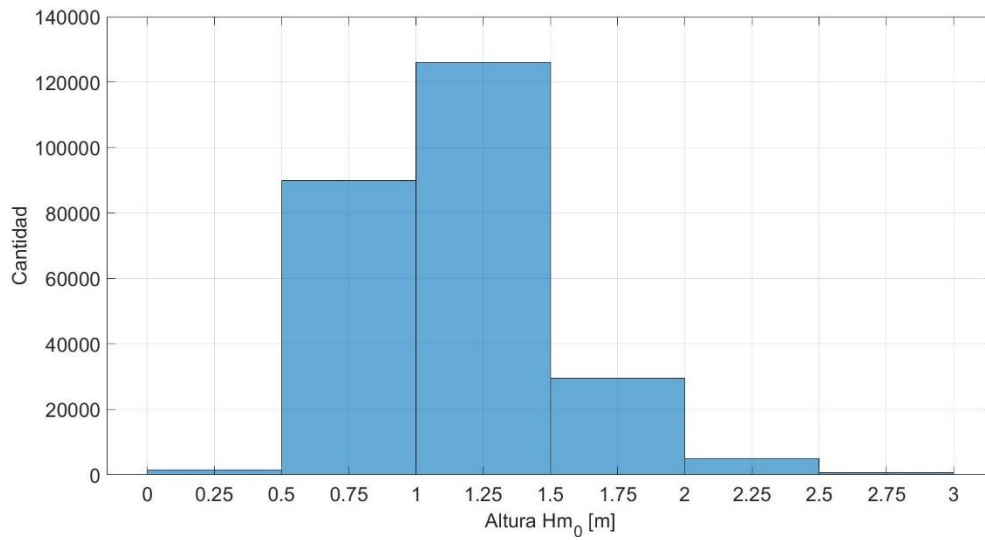


Ilustración 58: Histograma de alturas significativas espectrales 1990-2018

Fuente: Elaboración propia.

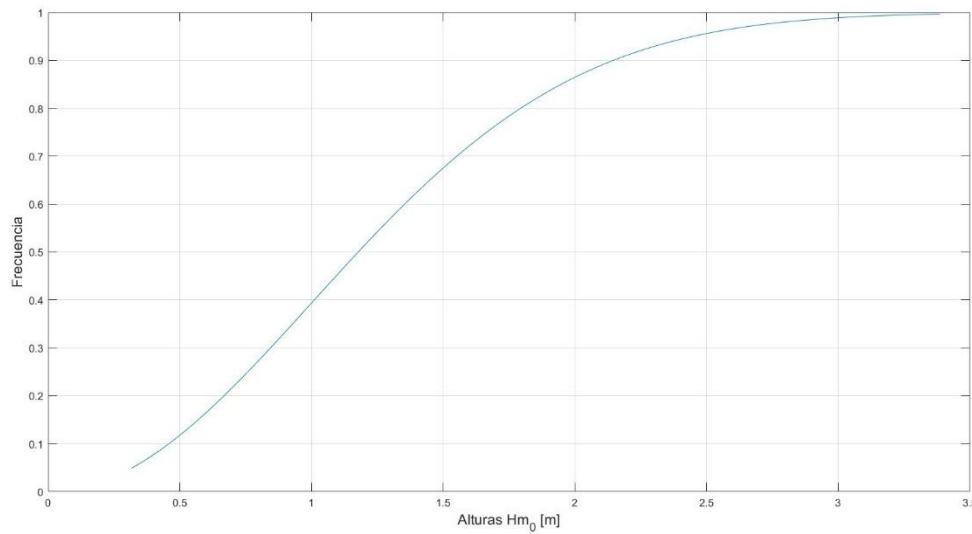


Ilustración 59: Gráfico de no excedencia alturas significativas espectrales 1990-2018

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 58, se observa el histograma de alturas significativas espectrales, donde la altura del oleaje que llega al nodo se encuentra entre los 0.5 [m] y 2.5 [m].

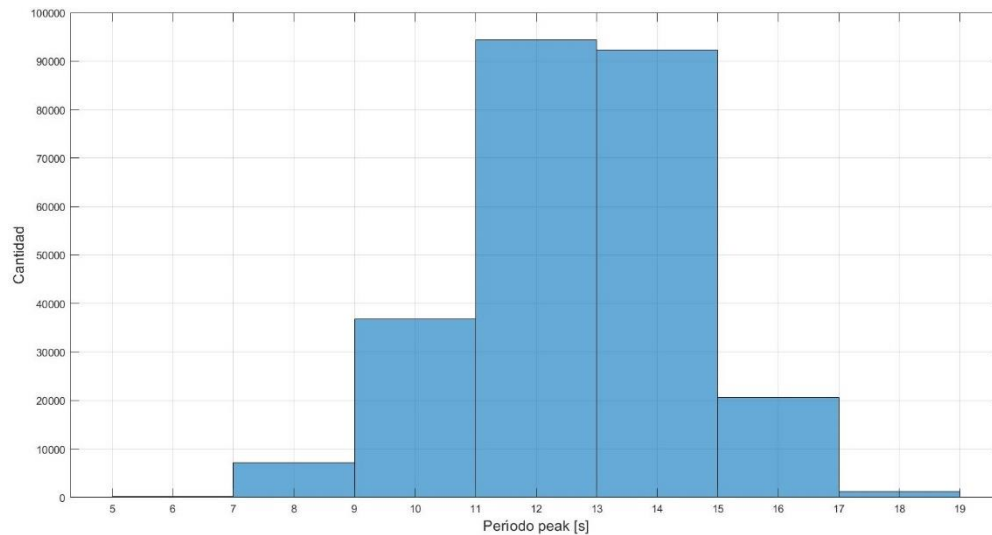


Ilustración 60: Histograma de periodos peak espectrales 1990-2018.

Fuente: Elaboración propia.

Los periodos según se observa en la Ilustración 60, se concentran entre los 9 [s] a los 17[s], los que ocurren con un 97.09% de frecuencia para esos intervalos.

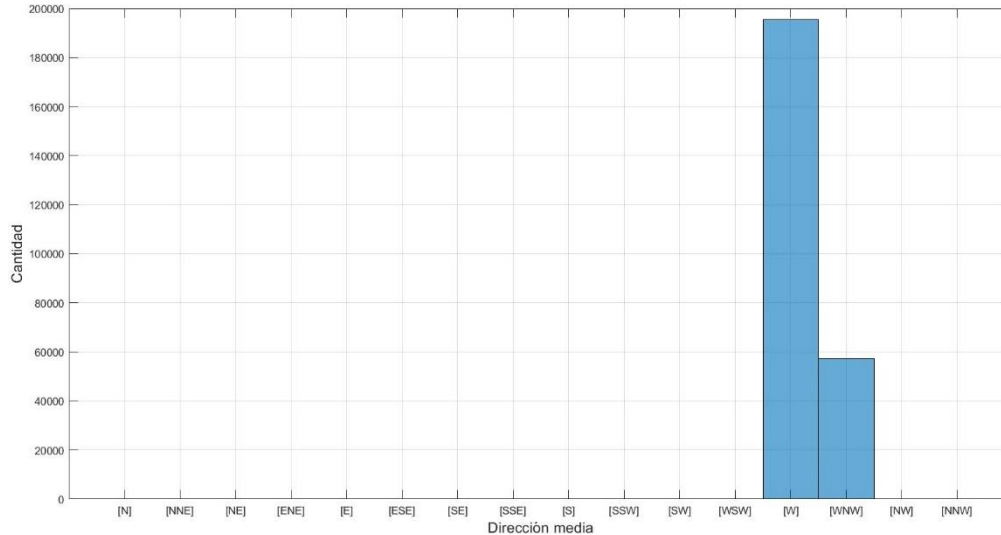


Ilustración 61: Histograma de direcciones medias 1990-2018

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las direcciones medias, todas las olas propagadas provienen desde el W o WNW sin ninguna dirección atípica, la mayor concentración de direcciones es la proveniente del W.

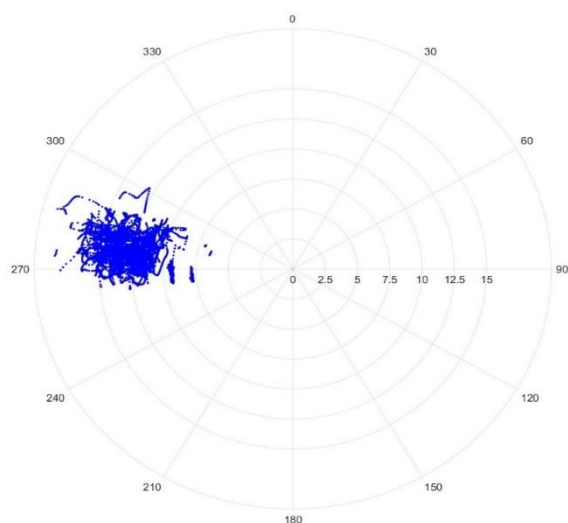


Ilustración 62: Rosa de dispersión, Período peak v/s Dirección media, 1990-2018.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 14 se presenta la tabla de incidencia de clima medio para Altura/Periodo y Altura/Dirección.

	Hm0									
Tp	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	Total general	F. relativa	F. acumulada
5-7		101	83	48				232	0.09%	100.00%
7-9	27	2964	3685	422	28	8		7134	2.82%	99.91%
9-11	211	13298	18582	4108	502	87		36788	14.56%	97.09%
11-13	562	34448	46333	10874	1923	225		94365	37.34%	82.53%
13-15	694	31824	46188	11403	1997	244	11	92361	36.54%	45.19%
15-17	132	6893	10546	2535	439	43		20588	8.15%	8.65%
17-19		408	694	124	48	2		1276	0.50%	0.50%
Total general	1626	89936	126111	29514	4937	609	11	252744		
F. relativa	0.64%	35.58%	49.90%	11.68%	1.95%	0.24%	0.00%			
F. acumulada	100.00%	99.36%	63.77%	13.88%	2.20%	0.25%	0.00%			

Tabla 14: Tabla de incidencia Hm0/Tp, 1990-2018

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 14 de incidencia de Hm0/Tp de los estados de mar, se puede desprender un análisis detallado respecto al comportamiento de la estadística. Se observa que de un total de 25.2744 estados de mar, el oleaje proviene con periodos peak entre 9 [s] a 15 [s], que equivalen al 91.44%. Respecto a las alturas es posible observar que el 97.16% tienen alturas significativas entre 0.5 [m] y 2.0 [m]. Es importante notar que hay 11 estados de mar

que se encuentran con alturas entre 3 [m] y 3.5 [m], las cuales corresponden a las marejadas ocurridas en julio de 2016.

		Hm0									
Dirección		0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	2-2.5	2.5-3	3-3.5	Total general	F. relativa	F. acumulada
W	258.75-281.25	1257	71184	98588	21044	3014	322		195409	77.31%	100.00%
WNW	281.25-303.75	369	18752	27523	8470	1923	287	11	57335	22.69%	22.69%
Total general		1626	89936	126111	29514	4937	609	11	252744		
F. relativa		0.64%	35.58%	49.90%	11.68%	1.95%	0.24%	0.00%			
F. acumulada		100.00%	99.36%	63.77%	13.88%	2.20%	0.25%	0.00%			

Tabla 15: Tabla de incidencia Hm0/Dirección media, 1990-2018

Fuente: Elaboración propia

Para la Tabla 15 de altura/dirección, se observa que las direcciones más frecuentes son las provenientes del W, con ángulos de incidencia entre los 258.75° a 281.25°, que se encuentran asociados a alturas de entre 0.5 [m] a 2 [m].

1.D.2 DATOS ADCP

Se analizaron los datos del ADCP antes mencionado desde el año 2015 hasta el 2018. Estos datos fueron utilizados para crear histogramas, tablas de incidencia y rosas de dispersión.

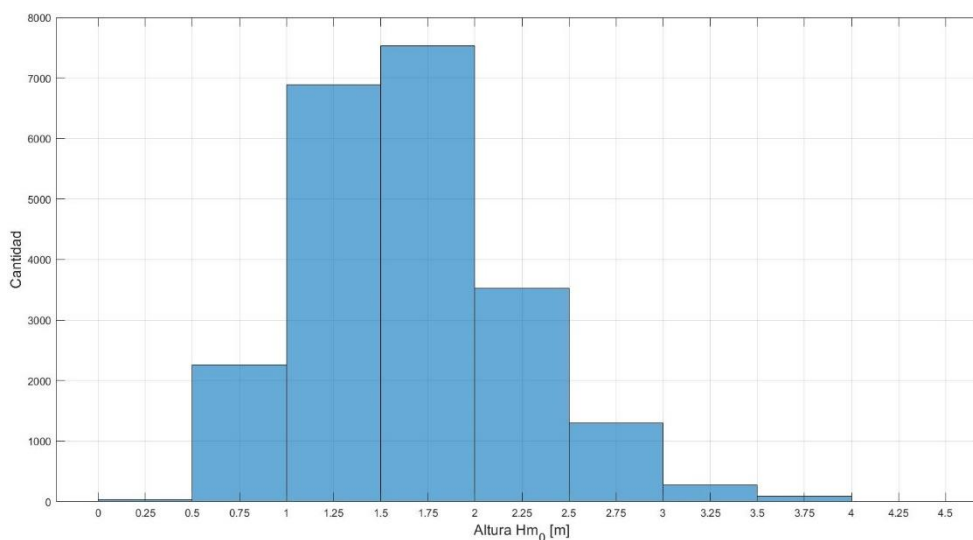


Ilustración 63: Histograma de alturas significativas espectrales ADCP 2015-2018

Fuente: Elaboración propia.

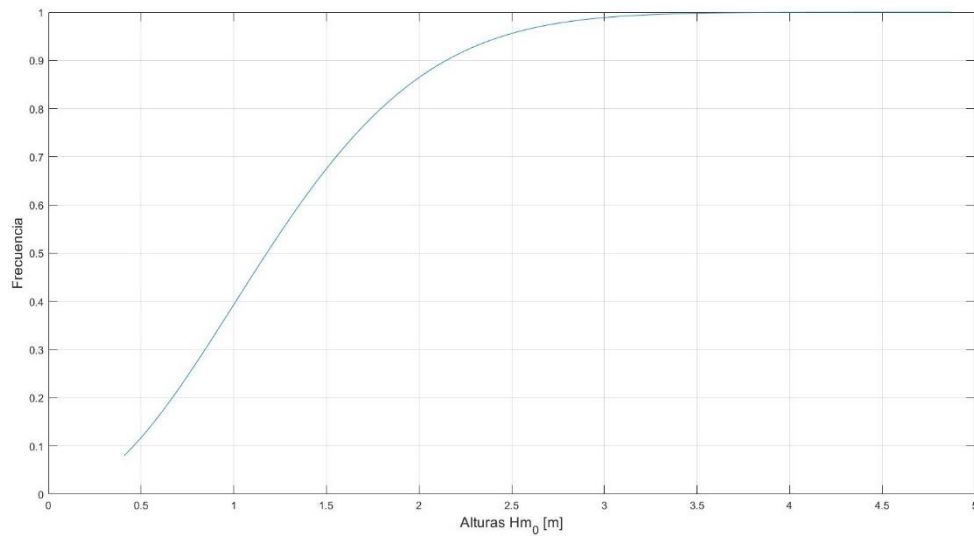


Ilustración 64: Gráfico de no excedencia alturas significativas espectrales ADCP 2015-2018

Fuente: Elaboración propia

En el caso del ADCP las alturas están agrupadas entre los 0 [m] a los 3 [m] que corresponden al 98.29% de los datos, con sólo un 1.72% de probabilidad de excedencia.

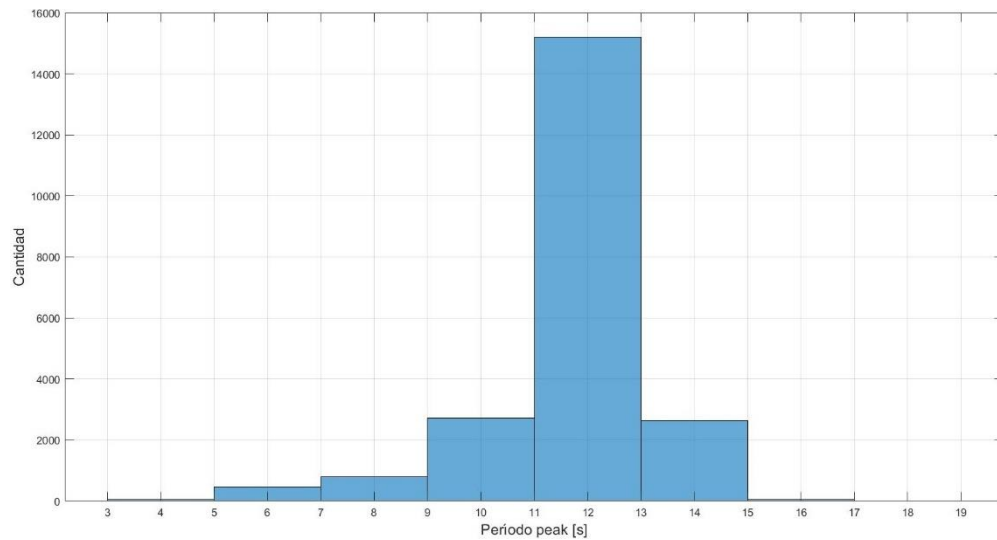


Ilustración 65: Histograma de períodos peak espectrales ADCP 2015-2018

Fuente: Elaboración propia.

Los períodos peak (Ilustración 65), se encuentran muy agrupados en el intervalo de los 11 [s] a los 13 [s], correspondiendo a un 69.4% de todos los datos. Al considerar los intervalos

adyacentes de los 9 [s] a los 11 [s] y de los 13 [s] a los 15 [s] se obtiene que la frecuencia es del 93.85% sólo en esos tres intervalos.

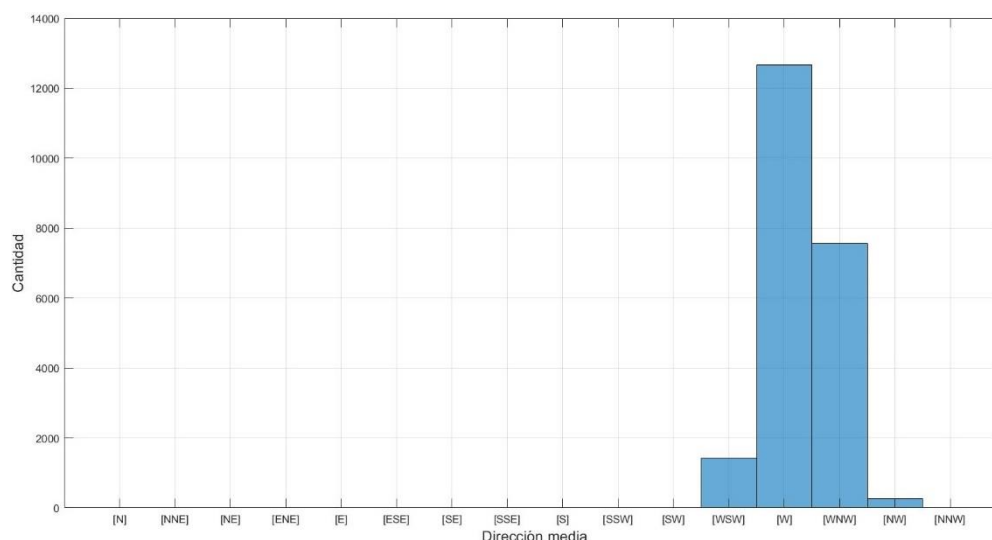


Ilustración 66: Histograma de direcciones medias ADCP 2015-2018

Fuente: Elaboración propia.

Para la Ilustración 66 se aprecia una mayor cantidad de direcciones en comparación a los datos propagados. Si los datos obtenidos por el ADCP son fiables se pueden considerar como la aproximación más cercana a la realidad, con esta información se puede comprender que los modelos son una aproximación más imprecisa. En estos datos se aprecia una tendencia a la dirección W y WNW al igual que en los datos propagados, sin embargo, se observan tres direcciones más, entre las cuales se destaca el WSW.

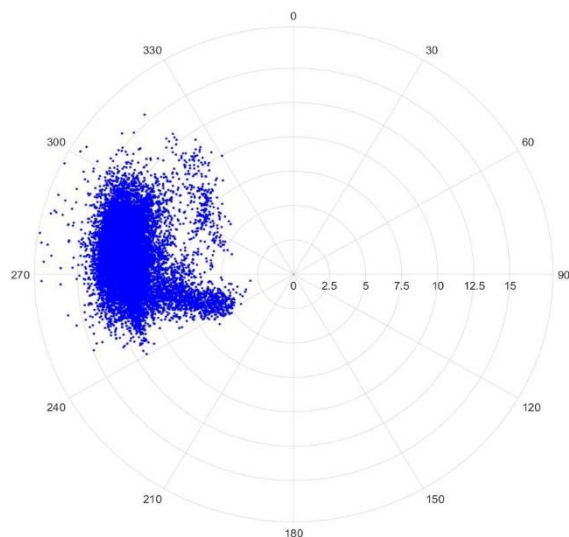


Ilustración 67: Rosa de dispersión, Período peak v/s Dirección media.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 16 se presentan las tablas de incidencia de clima medio para Altura significativa/Periodo Peak y Altura significativa/Dirección media correspondientes a los datos del ADCP.

	Hm0							
Tp	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	Total general	F. relativa	F. acumulada
3-5	15	29				44	0.20%	100.00%
5-7	122	332	9			463	2.11%	99.80%
7-9	109	639	40			788	3.59%	97.69%
9-11	298	2183	216	30		2727	12.44%	94.09%
11-13	1210	9689	4011	291	12	15213	69.40%	81.65%
13-15	525	1522	541	42	2	2632	12.01%	12.25%
15-17	19	19	4			42	0.19%	0.25%
17-19	1	10	1			12	0.05%	0.05%
Total general	2299	14423	4822	363	14	21921		
F. relativa	10.49%	65.80%	22.00%	1.66%	0.06%			
F. acumulada	100.00%	89.51%	23.72%	1.72%	0.06%			

Tabla 16: Tabla de incidencia Hm0/Tp

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 16 se nota que las combinaciones más frecuentes son las que se encuentran en los intervalos de 1 [m] a 2 [m] con períodos entre 11 [s] a 13 [s]. Los valores extremos de altura significativa, el 1.72% se encuentra por sobre los 3 [m], con 14 estados de mar entre los 4 a 5 [m].

Los períodos peak se encuentran en los intervalos desde los 9 [s] hasta los 15 [s]. Además, se observan los valores más extremos entre los 3 [s] a 5 [s] y los 17 [s] a 19 [s].

		Hm0							
Dirección		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	Total general	F. relativa	F. acumulada
SW	213.75-236.25		1				1	0.00%	100.00%
WSW	236.25-258.75	186	1176	62			1424	6.50%	100.00%
W	258.75-281.25	1231	9070	2312	53	1	12667	57.78%	93.50%
WNW	281.25-303.75	861	4053	2364	277	3	7558	34.48%	35.71%
NW	303.75-326.25	21	123	84	31	10	269	1.23%	1.24%
NNW	326.25-348.75				2		2	0.01%	0.01%
Total general		2299	14423	4822	363	14	21921		
F. relativa		10.49%	65.80%	22.00%	1.66%	0.06%			
F. acumulada		100.00%	89.51%	23.72%	1.72%	0.06%			

Tabla 17: Tabla de incidencia Hm0/MWD

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 17, se muestran todas las alturas y direcciones asociadas. Al igual que en el caso de los datos entregados por la Universidad de Valparaíso, las direcciones predominantes son el W y WNW, sin embargo, se nota una mayor cantidad de direcciones, entre las cuales se destacan WSW y NW, con una ocurrencia del 6.5% y 1.23% respectivamente.

Las alturas reinantes son entre 1 [m] a 2 [m] con dirección W, que corresponden al 41.38% del total de los datos, seguidas por el mismo intervalo de alturas, pero con dirección WNW con un 18.49%.

1.D.3 DATOS SITIO 9

Para realizar la comparación de los modelos se utilizaron datos obtenidos en el sitio 9 del Puerto de San Antonio.

Los datos que fueron utilizados corresponden a los meses de junio y julio del año 2010.

De la misma forma que en los casos anteriores, se realizaron tablas de incidencia y rosas de dispersión para el sitio 9, con las que es posible visualizar cuales son las alturas, períodos y direcciones con las que el oleaje llega al nodo.

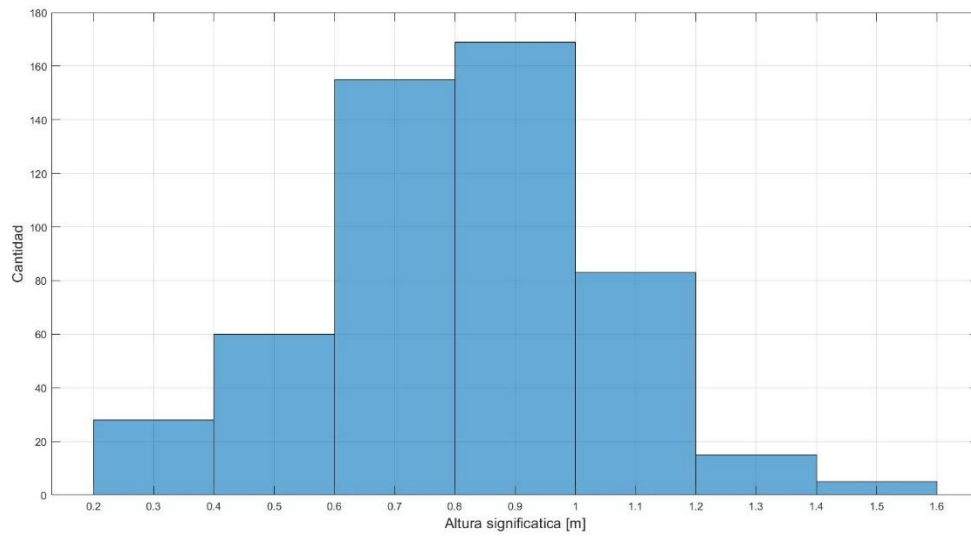


Ilustración 68: Histograma de alturas significativas sitio 9

Fuente: Elaboración propia.

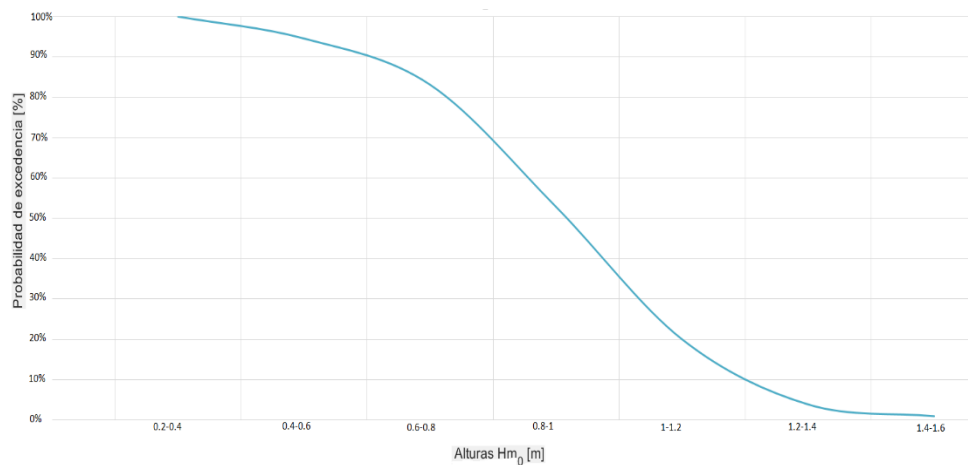


Ilustración 69: Gráfico de excedencia alturas significativas espectrales sitio 9 junio-julio 2010

Fuente: Elaboración propia

Cómo se aprecia en la Ilustración 68, las alturas que llegan al nodo son relativamente bajas, con mínimas entre 0.2 [m] a 0.4 [m] y máximas entre 1.4 [m] a 1.6 [m], donde el tamaño típico se encuentra en el intervalo 0.6 [m] a 1 [m], el cual corresponde al 63.11% de los datos.

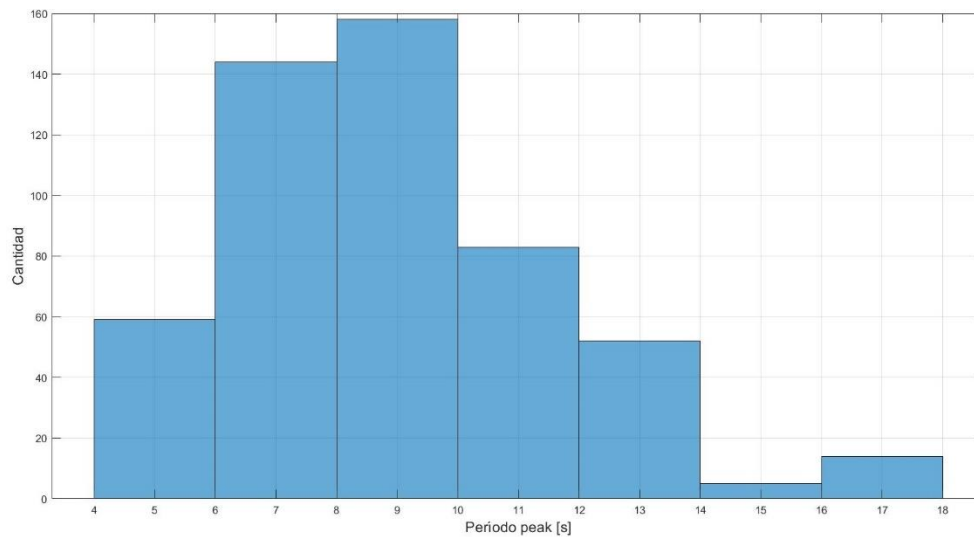


Ilustración 70: Histograma de períodos peak sitio 9

Fuente: Elaboración propia

El histograma de períodos (Ilustración 70) muestra una amplia distribución de valores, con mínimos entre 4 [s] a 6 [s] y máximos entre 16 [s] a 18 [s], sin embargo se destaca que las más bajas ocurrencias son en el intervalo de 14 [s] a 16 [s] que corresponde al 0.97%. Respecto a los valores típicos estos se encuentran entre los 6 [s] a 10 [s], los que equivalen a una frecuencia de 58.64%.

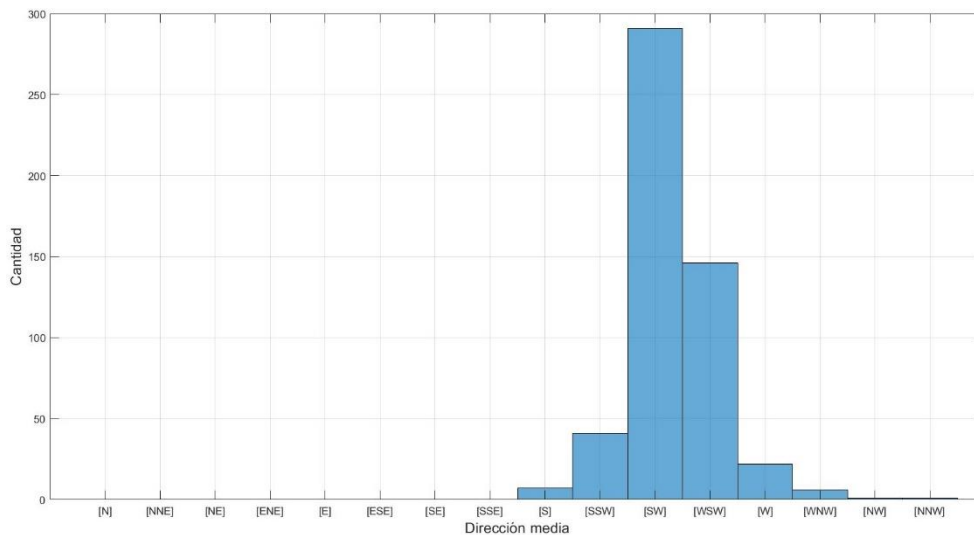


Ilustración 71: Histograma de dirección sitio 9

Fuente: Elaboración propia

Las direcciones a diferencia de los casos anteriores tienen una tendencia a la componente sur, siendo el SW y WSW las direcciones más típicas, en las cuales se concentran el 84.85%.

	Hm0						
Tp	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	Total general	F. relativa	F. acumulada
4-7	9	97	29		135	26.21%	100.00%
7-10	17	159	48	2	226	43.88%	73.79%
10-13	9	83	22	2	116	22.52%	29.90%
13-16	12	12			24	4.66%	7.38%
16-19	9	5			14	2.72%	2.72%
Total general	56	356	99	4	515		
F. relativa	10.87%	69.13%	19.22%	0.78%			
F. acumulada	100.00%	89.13%	20.00%	0.78%			

Tabla 18: Tabla de incidencia Hm0/Tp sitio 9

Fuente: Elaboración propia.

		Hm0						
	Dirección	0-0.5	0.5-1	1-1.5	1.5-2	Total general	F. relativa	F. acumulada
S	168.75-191.25		7			7	1.36%	100.00%
SSW	191.25-213.75	8	27	5	1	41	7.96%	98.64%
SW	213.75-236.25	25	210	54	2	291	56.50%	90.68%
WSW	236.25-258.75	11	95	39	1	146	28.35%	34.17%
W	258.75-281.25	7	14	1		22	4.27%	5.83%
WNW	281.25-303.75	4	2			6	1.17%	1.55%
NW	303.75-326.25	1				1	0.19%	0.39%
NNW	326.25-348.75		1			1	0.19%	0.19%
	Total general	56	356	99	4	515		
	F. relativa	10.87%	69.13%	19.22%	0.78%			
	F. acumulada	100.00%	89.13%	20.00%	0.78%			

Tabla 19: Tabla de incidencia Hm0/Dir sitio 9

Fuente: Elaboración propia

E. DATOS OBTENIDOS PARA LOS OTROS PUNTOS DE INTERÉS

1.E.1 CELERIS

Nodo 2

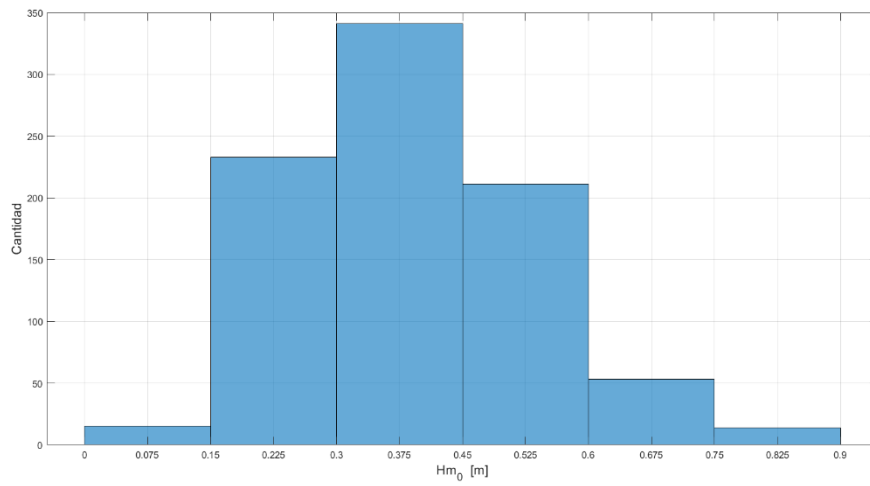


Ilustración 72: Histograma de alturas significativas nodo 2 Celeris

Fuente: Elaboración propia

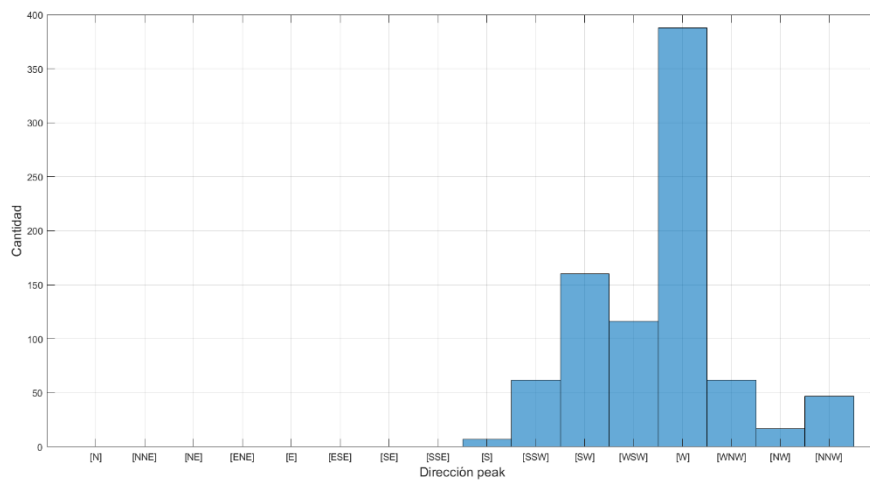


Ilustración 73: Histograma de direcciones peak nodo 2 Celeris

Fuente: Elaboración propia

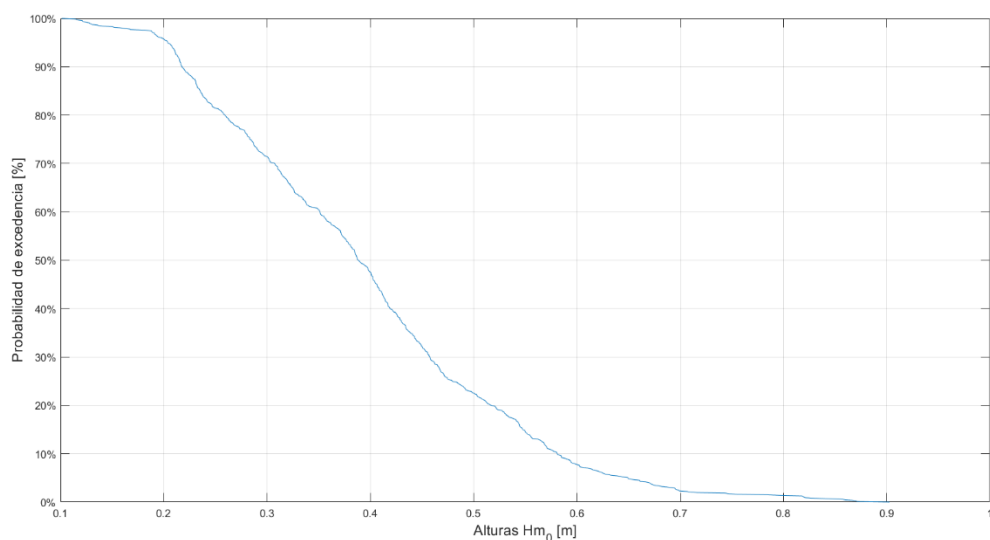


Ilustración 74: Curva de excedencia Hm0 nodo 2 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Tp	Hm0						Total general	F. relativa	F. acumulada
	0.1-0.25	0.25-0.4	0.4-0.55	0.55-0.7	0.7-0.85	0.85-1			
7-9	25						25	2.88%	100.00%
9-11	28						28	3.23%	97.12%
11-13	4	51	16				71	8.18%	93.89%
13-15	12	93	65	3			173	19.93%	85.71%
15-17	93	149	205	104	14	6	571	65.78%	65.78%
Total general	162	293	286	107	14	6	868		
F. relativa	18.66%	33.76%	32.95%	12.33%	1.61%	0.69%			
F. acumulada	100.00%	81.34%	47.58%	14.63%	2.30%	0.69%			

Tabla 20: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 2 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Dp		Hm0						Total general	F. relativa	F. acumulada
		0.1-0.25	0.25-0.4	0.4-0.55	0.55-0.7	0.7-0.85	0.85-1			
S	168.75-191.25	5	2					7	0.81%	100.00%
SSW	191.25-213.75	8	13	20	21			62	7.14%	99.19%
SW	213.75-236.25	8	35	69	42	5	1	160	18.43%	92.05%
WSW	236.25-258.75	16	33	40	20	3	4	116	13.36%	73.62%
W	258.75-281.25	46	180	135	20	6	1	388	44.70%	60.25%
WNW	281.25-303.75	10	26	22	4			62	7.14%	15.55%
NW	303.75-326.25	15	2					17	1.96%	8.41%
NNW	326.25-348.75	47						47	5.41%	6.45%
N	348.75-11.25	7	2					9	1.04%	1.04%
Total general		162	293	286	107	14	6	868		
F. relativa		18.66%	33.76%	32.95%	12.33%	1.61%	0.69%			
F. acumulada		100.00%	81.34%	47.58%	14.63%	2.30%	0.69%			

Tabla 21: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 2 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Dp		Tp							
		7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	Total general	F. relativa	F. acumulada
S	168.75-191.25		1		2	4	7	0.81%	100.00%
SSW	191.25-213.75			1	3	58	62	7.14%	99.19%
SW	213.75-236.25	2		2	7	149	160	18.43%	92.05%
WSW	236.25-258.75			3	15	98	116	13.36%	73.62%
W	258.75-281.25	6		58	127	197	388	44.70%	60.25%
WNW	281.25-303.75	3		7	17	35	62	7.14%	15.55%
NW	303.75-326.25	9			1	7	17	1.96%	8.41%
NNW	326.25-348.75	4	24		1	18	47	5.41%	6.45%
N	348.75-11.25	1	3			5	9	1.04%	1.04%
Total general		25	28	71	173	571	868		
F. relativa		2.88%	3.23%	8.18%	19.93%	65.78%			
F. acumulada		100.00%	97.12%	93.89%	85.71%	65.78%			

Tabla 22: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 2 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Nodo 3

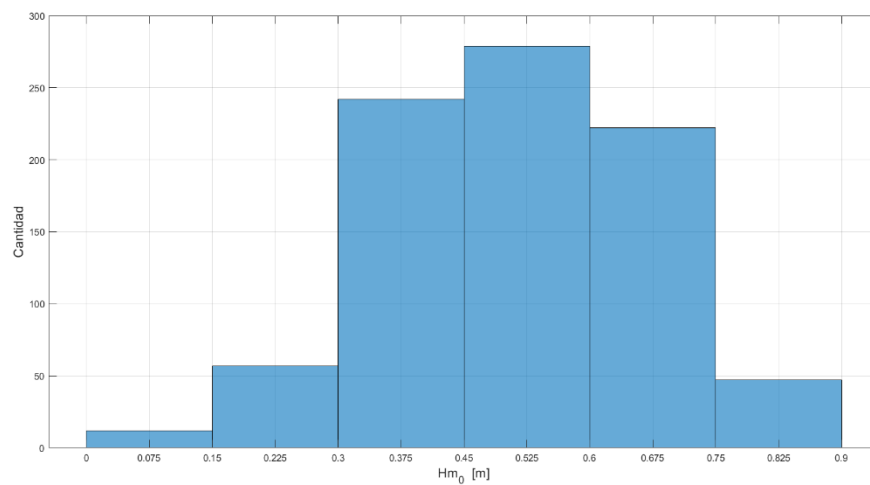


Ilustración 75: Histograma de alturas significativas nodo 3 Celeris

Fuente: Elaboración propia

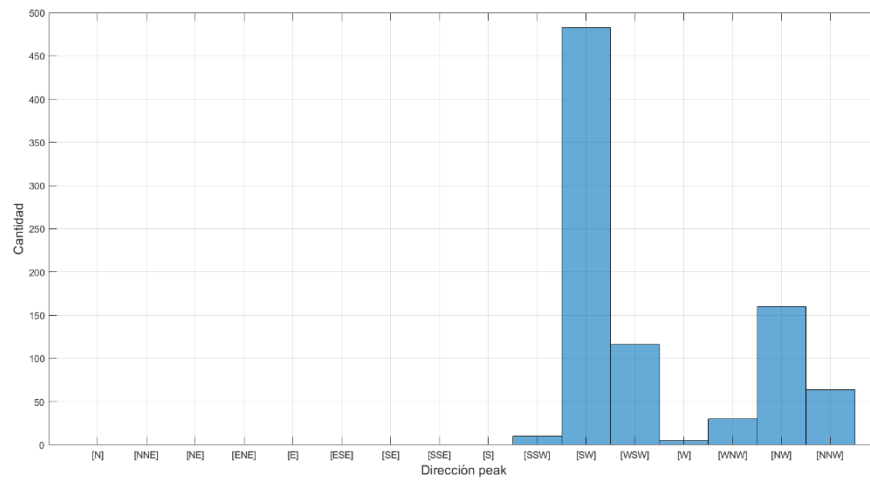


Ilustración 76: Histograma de direcciones peak nodo 3 Celeris

Fuente: Elaboración propia

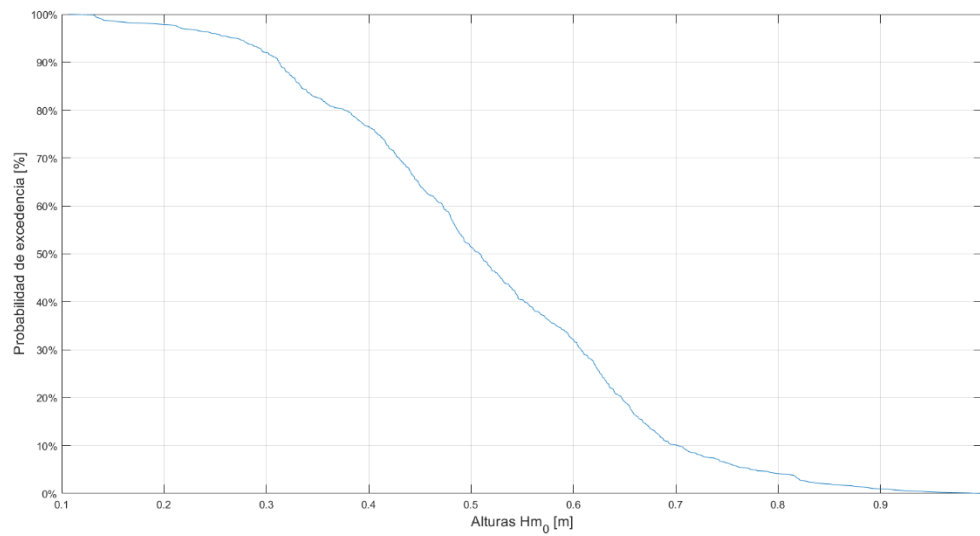


Ilustración 77: Curva de excedencia H_{m0} nodo 3 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Tp	Hm0									
	0.05-0.2	0.2-0.35	0.35-0.5	0.5-0.65	0.65-0.8	0.8-0.95	0.95-1.1	Total general	F. relativa	F. acumulada
7-9		8	30					38	4.38%	100.00%
9-11	1	15	17					33	3.80%	95.62%
11-13			84	106	33	8		231	26.61%	91.82%
13-15	11	46	37	84	22	3		203	23.39%	65.21%
15-17	7	61	78	70	44	18	2	280	32.26%	41.82%
17-19		2	15	10	14	2	1	44	5.07%	9.56%
19-21		1	8	11	17	2		39	4.49%	4.49%
Total general	19	133	269	281	130	33	3	868		
F. relativa	2.19%	15.32%	30.99%	32.37%	14.98%	3.80%	0.35%			
F. acumulada	100.00%	97.81%	82.49%	51.50%	19.12%	4.15%	0.35%			

Tabla 23: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 3 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Dp		Hm0								F. relativa	F. acumulada
		0.05-0.2	0.2-0.35	0.35-0.5	0.5-0.65	0.65-0.8	0.8-0.95	0.95-1.1	Total general		
SSW	191.25-213.75		1	4	4	1			10	1.15%	100.00%
SW	213.75-236.25	17	75	148	180	56	7		483	55.65%	98.85%
WSW	236.25-258.75	1	10	24	53	22	6		116	13.36%	43.20%
W	258.75-281.25				2	2	1		5	0.58%	29.84%
WNW	281.25-303.75		9	6	7	5	3		30	3.46%	29.26%
NW	303.75-326.25	1	31	71	18	26	10	3	160	18.43%	25.81%
NNW	326.25-348.75		7	16	17	18	6		64	7.37%	7.37%
	Total general	19	133	269	281	130	33	3	868		
	F. relativa	2.19%	15.32%	30.99%	32.37%	14.98%	3.80%	0.35%			
	F. acumulada	100.00%	97.81%	82.49%	51.50%	19.12%	4.15%	0.35%			

Tabla 24: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 3 Celeris

Fuente: Elaboración propia

Dp		Tp								F. relativa	F. acumulada
		7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	Total general		
SSW	191.25-213.75			1	4	5			10	1.15%	100.00%
SW	213.75-236.25		2	130	152	181	11	7	483	55.65%	98.85%
WSW	236.25-258.75	1		74	29	12			116	13.36%	43.20%
W	258.75-281.25			5					5	0.58%	29.84%
WNW	281.25-303.75	3	5	16	5	1			30	3.46%	29.26%
NW	303.75-326.25	34	26	5	11	37	28	19	160	18.43%	25.81%
NNW	326.25-348.75				2	44	5	13	64	7.37%	7.37%
	Total general	38	33	231	203	280	44	39	868		
	F. relativa	4.38%	3.80%	26.61%	23.39%	32.26%	5.07%	4.49%			
	F. acumulada	100.00%	95.62%	91.82%	65.21%	41.82%	9.56%	4.49%			

Tabla 25: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 3 Celeris

Fuente: Elaboración propia

1.E.2 SWASH

Nodo 2

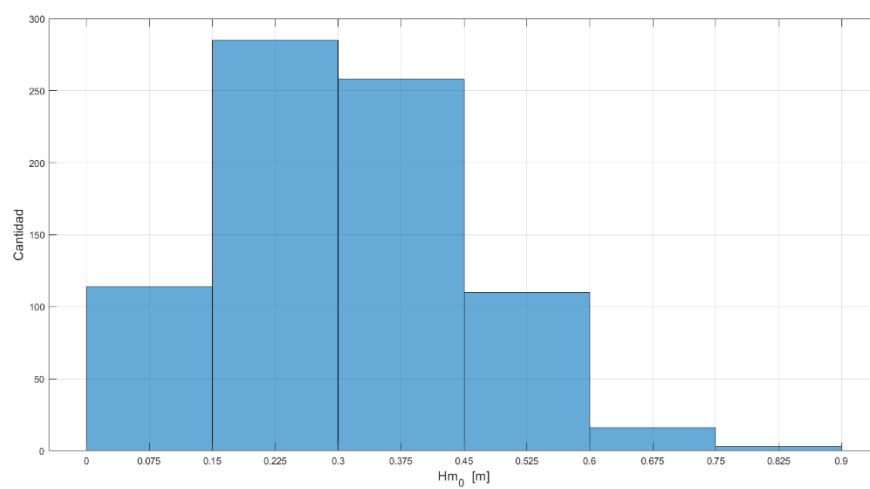


Ilustración 78: Histograma de alturas significativas nodo 2 SWASH

Fuente: Elaboración propia

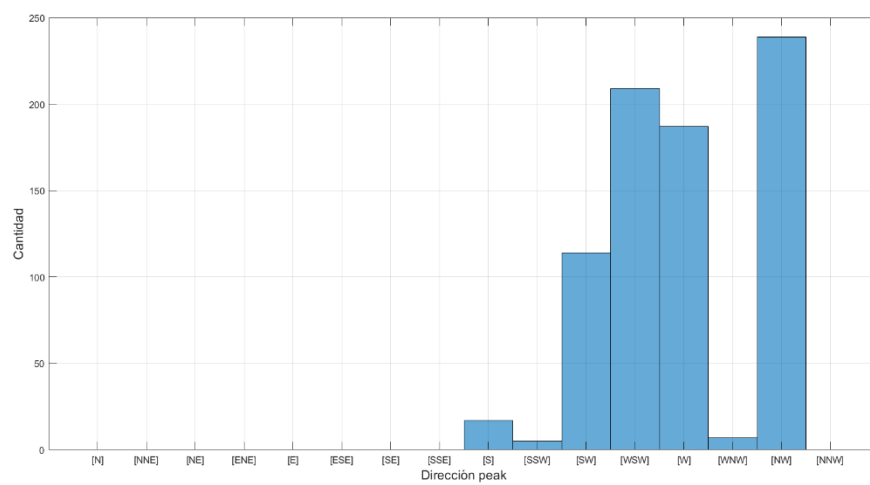


Ilustración 79: Histograma de direcciones peak nodo 2 SWASH

Fuente: Elaboración propia

Tp	Hm0						
	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	Total general	F. relativa	F. acumulada
9-11	44				44	5.60%	100.00%
11-13	86	73			159	20.23%	94.40%
13-15	1	18	15		34	4.33%	74.17%
15-17	50	289	183	19	541	68.83%	69.85%
17-19		1	1		2	0.25%	1.02%
19-21			6		6	0.76%	0.76%
Total general	181	381	205	19	786		
F. relativa	23.03%	48.47%	26.08%	2.42%			
F. acumulada	100.00%	76.97%	28.50%	2.42%			

Tabla 26: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 2 SWASH

Fuente: Elaboración propia

Dp		Hm0						
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	Total general	F. relativa	F. acumulada
S	168.75-191.25		1	15	1	17	2.16%	100.00%
SSW	191.25-213.75		1	2	2	5	0.64%	97.84%
SW	213.75-236.25	39	75			114	14.50%	97.20%
WSW	236.25-258.75	6	135	68		209	26.59%	82.70%
W	258.75-281.25		65	106	16	187	23.79%	56.11%
WNW	281.25-303.75	3	3	1		7	0.89%	32.32%
NW	303.75-326.25	133	99	7		239	30.41%	31.42%
N	348.75-371.25		2	6		8	1.02%	1.02%
Total general		181	381	205	19	786		
F. relativa		23.03%	48.47%	26.08%	2.42%			
F. acumulada		100.00%	76.97%	28.50%	2.42%			

Tabla 27: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 2 SWASH

Fuente: Elaboración propia

Dp		Tp								
		9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	Total general	F. relativa	F. acumulada
S	168.75-191.25				17			17	2.16%	100.00%
SSW	191.25-213.75				5			5	0.64%	97.84%
SW	213.75-236.25		4	6	104			114	14.50%	97.20%
WSW	236.25-258.75		2	19	188			209	26.59%	82.70%
W	258.75-281.25			1	184	2		187	23.79%	56.11%
WNW	281.25-303.75		1	1	5			7	0.89%	32.32%
NW	303.75-326.25	44	152	7	36			239	30.41%	31.42%
N	348.75-371.25				2		6	8	1.02%	1.02%
Total general		44	159	34	541	2	6	786		
F. relativa		5.60%	20.23%	4.33%	68.83%	0.25%	0.76%			
F. acumulada		100.00%	94.40%	74.17%	69.85%	1.02%	0.76%			

Tabla 28: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 2 SWASH

Fuente: Elaboración propia

Nodo 3

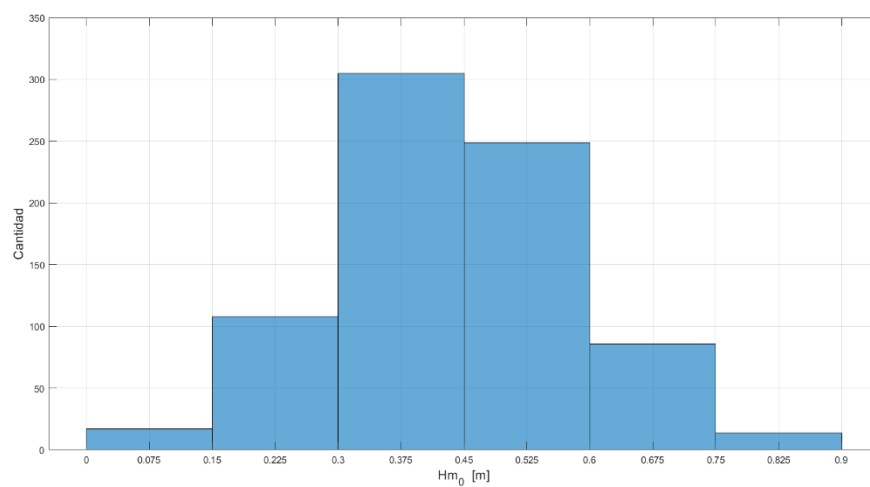


Ilustración 80: Histograma de alturas significativas nodo 3 SWASH

Fuente: Elaboración propia

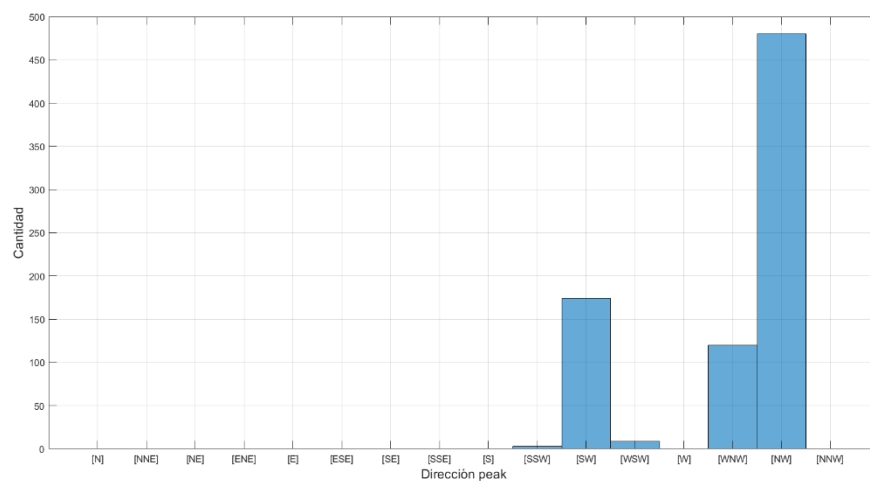


Ilustración 81: Histograma de direcciones peak nodo 3 SWASH

Fuente: Elaboración propia

Tp	Hm0							F. relativa	F. acumulada
	0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	Total general		
9-11	16	86	37	3			142	18.07%	100.00%
11-13	16	15	13				44	5.60%	81.93%
13-15		2	7				9	1.15%	76.34%
15-17	18	163	266	30			477	60.69%	75.19%
17-19		1	39	60	6		106	13.49%	14.50%
19-21			1	1	5	1	8	1.02%	1.02%
Total general	50	267	363	94	11	1	786		
F. relativa	6.36%	33.97%	46.18%	11.96%	1.40%	0.13%			
F. acumulada	100.00%	93.64%	59.67%	13.49%	1.53%	0.13%			

Tabla 29: Tabla de incidencia Hm0/Tp nodo 3 SWASH

Fuente: Elaboración propia

Dp		Hm0							F. relativa	F. acumulada
		0-0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1	1-1.2	Total general		
SSW	191.25-213.75		2	1				3	0.38%	100.00%
SW	213.75-236.25		53	110	11			174	22.14%	99.62%
WSW	236.25-258.75		1	7	1			9	1.15%	77.48%
WNW	281.25-303.75	3	80	35	2			120	15.27%	76.34%
NW	303.75-326.25	47	131	210	80	11	1	480	61.07%	61.07%
Total general		50	267	363	94	11	1	786		
F. relativa		6.36%	33.97%	46.18%	11.96%	1.40%	0.13%			
F. acumulada		100.00%	93.64%	59.67%	13.49%	1.53%	0.13%			

Tabla 30: Tabla de incidencia Hm0/Dp nodo 3 SWASH

Fuente: Elaboración propia

Dp		Tp						Total general	F. relativa	F. acumulada
		9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21			
SSW	191.25-213.75			1	2			3	0.38%	100.00%
SW	213.75-236.25			2	172			174	22.14%	99.62%
WSW	236.25-258.75				9			9	1.15%	77.48%
WNW	281.25-303.75	55	23		40	2		120	15.27%	76.34%
NW	303.75-326.25	87	21	6	254	104	8	480	61.07%	61.07%
Total general		142	44	9	477	106	8	786		
F. relativa		18.07%	5.60%	1.15%	60.69%	13.49%	1.02%			
F. acumulada		100.00%	81.93%	76.34%	75.19%	14.50%	1.02%			

Tabla 31: Tabla de incidencia Tp/Dp nodo 3 SWASH

Fuente: Elaboración propia