



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

MODELADO DE ONDA LARGA EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO, CHILE, COMPARACIÓN
ENTRE MIKE 21 BW Y SWASH

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DANKO RODRIGO MUNITA ORTIZ

PROFESOR GUÍA:

CÉSAR GUZMÁN MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

YARKO NIÑO CAMPOS

ANDRÉS PUELMA MÜLLER

Powered@NLHPC: Este trabajo fue parcialmente apoyada por la infraestructura de
supercómputo del NLHPC (ECM-02)

SANTIAGO DE CHILE
2020

Resumen de la memoria
para optar al título de
ingeniero civil
Por: Danko Munita Ortiz
Fecha: 17/08/2020
Prof. guía: César Guzmán Mardones

MODELADO DE ONDA LARGA EN EL PUERTO DE SAN ANTONIO, CHILE, COMPARACIÓN ENTRE MIKE 21 BW Y SWASH

En los últimos 60 años el creciente intercambio de bienes ha significado un aumento en las dimensiones de las naves que realizan el transporte marítimo debido a las economías de escalas asociadas. Las naves de mayores dimensiones (esloras mayores a ~300m) son más propensas a ser excitadas por oleaje de mayor periodo (periodos pico mayores a 100s), como los que se presentan actualmente al interior de los puertos de la costa americana del océano pacífico o los que se proyecta desarrollar. Esta condición, conocida como resonancia de dársena, presenta un problema serio en la operación de los terminales y es generada por la interacción de la geometría del puerto con componentes de energía de baja frecuencia en el oleaje. Estas componentes del oleaje son conocidas como oleaje de onda larga.

El presente trabajo de título analiza y compara los resultados asociados al fenómeno de onda larga que se obtienen a partir de los modelos numéricos del tipo *phase resolving*, MIKE 21 BW y SWASH. Se seleccionó el Puerto de San Antonio, Chile, como escenario de modelado, debido a la relevancia que tiene este terminal a nivel nacional y la disponibilidad de datos que existen en el lugar. Estos últimos son utilizados con el objetivo de validar los modelos. El análisis y comparación se realizó en términos de aspectos técnicos tales como parámetros estadísticos, componentes del espectro de oleaje; y a través de aspectos prácticos como recursos computacionales. Para el modelado se seleccionó un set de estados de mar asociados a la data disponible en el puerto de San Antonio. A través del modelado se obtuvieron resultados de propagación de oleaje, espectros de oleaje, alturas significativas, relaciones de onda corta y onda larga, entre otros. Estos resultados fueron analizados con el objetivo principal de caracterizar los modelos, y compararlos en base a sus resultados.

Finalmente, se concluyó mediante el correspondiente análisis que los resultados obtenidos con ambos modelos no presentan diferencias significativas respecto al fenómeno en cuestión, así siendo consistentes entre sí. Por otro lado, la diferencia entre ambos modelos radica en la demanda computacional requerida por ambos. Para efectos del modelado del puerto de San Antonio, Chile, el modelo SWASH presentó un costo computacional mayor al requerido por el modelo MIKE 21 BW, en lo que respecta el tiempo de cómputo.

A mis padres y hermanas, por su amor incondicional

A mis abuelos, por su cariño sin límites

Agradecimientos

A lo largo de mi estadía en la universidad, conocí y compartí con mucha gente que de alguna u otra manera contribuyó a que esta etapa de la vida fuera muy enriquecedora en muchos aspectos.

En primer lugar, me gustaría agradecer a mis padres, hermanas y abuelos por todo el amor y apoyo que me dieron a lo largo de estos años. Es muy lindo saber que las alegrías de uno también lo son para ellos. Los quiero mucho y este trabajo va dedicado a ustedes.

Agradezco a los miembros de mi comisión en especial a César Guzmán por todo el apoyo y conocimiento que me entregaron a lo largo del desarrollo del presente trabajo. Gracias por la buena disposición a atender todas las dudas que fueron surgiendo. Quiero también dar reconocimiento a la buena labor que desempeña César dictando el curso de hidráulica marítima, es de los profesores que se les nota que les gusta enseñar y que plantea problemas desafiantes y motivantes. Sigue así haces una muy buena labor.

Agradezco a EPSA (Empresa Portuaria de San Antonio) por facilitarme información valiosa para la construcción del presente estudio.

Estoy muy agradecido con el equipo de hidráulica de la oficina PRDW, por todo el tiempo que me dedicaron enseñándome y orientándome durante mi última práctica profesional y mi trabajo de título. En especial a César Guzmán, Benjamín Carrión, Carlos Rozas, Daniel Caichac y Tomás Cuevas.

Quiero también agradecer a mis amigos de plan común, a los de Rancagua, a los de civil e hidráulica, por todos los buenos momentos que pasamos a lo largo de los años, el apoyo mutuo que nos dimos, los carretes, las eternas noches de estudios y los viajes. También darle las gracias, a mis amigos del colegio, Josefa, Maca, Tente y Fabián, con los cuales nos apoyamos durante nuestra estadía en la universidad. A la Gaba y a Joaquín por acompañarnos y apoyarnos durante la especialidad. Finalmente quiero agradecer en especial a mis amigos de la vida Tomas y Miti, por estar conmigo en las buenas y en las malas, siempre apoyándome y tendiéndome una mano cuando lo necesité. Mis más sinceros cariños a toda la gente hermosa que hizo que esta etapa fuera muy bella.

Una persona muy importante durante mis últimos dos años de universidad es mi polola Paz, a ella quiero agradecerle todo el apoyo, amor y cariño que me dio durante todo el desarrollo de este trabajo, eres un pilar fundamental en mi vida, te amo.

Por último, agradecerles a mis equipos de fútbol Delfín y Sub 21, en especial al Eche, al Gato y al Mati, con los cuales compartimos la mayoría de los torneos. Gracias por todos los partidos perdidos y los escasos ganados, pero que fueron bien celebrados.

Tabla de contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción..... | 19 |
| 1.1. Motivación..... | 19 |
| 1.2. Objetivos..... | 19 |
| 1.2.1. Objetivo general..... | 19 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 20 |
| 1.3. Organización del informe..... | 20 |
| 1.4. Comentarios..... | 21 |
| 2. Revisión bibliográfica..... | 22 |
| 2.1. Onda de infragravedad..... | 23 |
| 2.1.1. Definición..... | 23 |
| 2.1.2. Generación..... | 24 |
| 2.1.3. Disipación..... | 26 |
| 2.2. Modelos numéricos..... | 26 |
| 2.2.1. MIKE 21 BW..... | 27 |
| 2.2.2. SWASH..... | 28 |
| 2.2.3. Características Principales de los Modelos..... | 29 |
| 2.3. Estudios similares de onda de infragravedad en otros Puertos..... | 31 |
| 2.3.1. Puerto de Ngquar, Sudáfrica..... | 31 |
| 2.3.2. Puerto de Sines, Portugal..... | 31 |
| 2.3.3. Puerto de Thorsminde, Dinamarca..... | 32 |
| 2.3.4. Puerto de Barbers Point, Estados Unidos..... | 32 |
| 2.3.5. Marina de Blankenberge, Bélgica..... | 33 |
| 2.4. Comentarios..... | 33 |

Tabla de contenido

| | |
|---|-----------|
| 3. Metodología de análisis | 35 |
| 3.1. Introducción..... | 35 |
| 3.2. Modelo y puntos de interés | 35 |
| 3.3. Espectro de frecuencia..... | 37 |
| 3.4. Altura significativa espectral asociada al contenido total y de onda larga | 38 |
| 3.5. Comparación de propagación..... | 39 |
| 3.6. Comparación de espectros en el punto P0 | 40 |
| 3.7. Comparación espacial en la dársena de San Antonio de los espectros | 40 |
| 3.8. Relación de altura significativa espectral de onda corta fuera del puerto y onda larga dentro del puerto | 41 |
| 3.9. Modos resonantes del puerto de San Antonio | 41 |
| 3.10. Tiempo computacional..... | 42 |
| 4. Condiciones de oleaje modeladas..... | 43 |
| 4.1. Introducción..... | 43 |
| 4.2. Condiciones de oleaje | 43 |
| 5. Construcción de los modelos | 45 |
| 5.1. Introducción..... | 45 |
| 5.2. Especificaciones de los modelos..... | 45 |
| 5.3. Batimetría..... | 45 |
| 5.4. Porosidad..... | 47 |
| 5.5. Absorción de energía | 49 |
| 5.6. Fricción..... | 51 |
| 5.7. Número de capas verticales utilizadas en SWASH | 52 |
| 6. Resultados del modelado numérico con MIKE 21 BW y SWASH | 55 |
| 6.1. Trayectorias..... | 55 |

Tabla de contenido

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 6.2. | Espectro completo | 56 |
| 6.3. | Altura significativa espectral del contenido total del espectro | 59 |
| 6.4. | Altura significativa espectral del contenido de onda larga del espectro | 61 |
| 6.5. | Dársena | 62 |
| 6.5.1. | Altura significativa espectral, contenido total del espectro..... | 62 |
| 6.5.2. | Altura significativa espectral, contenido onda larga del espectro..... | 65 |
| 6.6. | Relación de los parámetros de la condición de borde con la altura significativa asociada al contenido de onda larga en P1..... | 69 |
| 6.7. | Relación altura de onda corta al exterior del puerto con altura de onda larga en el punto P0 y los sitios..... | 71 |
| 6.8. | Frecuencias resonantes | 72 |
| 6.9. | Tiempo de cómputo..... | 76 |
| 7. | Discusión de resultados..... | 77 |
| 7.1. | Introducción..... | 77 |
| 7.2. | Trayectorias..... | 77 |
| 7.3. | Espectro completo | 78 |
| 7.4. | Altura significativa espectral del contenido total del espectro | 79 |
| 7.5. | Altura significativa espectral del contenido de onda larga del espectro | 80 |
| 7.6. | Distribución de la altura significativa espectral del contenido total y del contenido de onda larga dentro de la dársena del puerto de San Antonio..... | 81 |
| 7.7. | Relación de los parámetros del espectro configurado como condición de borde y la altura significativa del contenido de onda larga en P1..... | 82 |
| 7.8. | Relación altura de onda corta al exterior del puerto con altura de onda larga en el punto P0 y los sitios..... | 83 |
| 7.9. | Modos resonantes | 83 |
| 7.10. | Comparación cualitativa de la construcción y ejecución de los modelos numéricos, sensación usuario | 84 |
| 8. | Conclusiones y trabajo futuro..... | 86 |

Tabla de contenido

| | |
|------------------------------|------------|
| 8.1. Conclusiones | 86 |
| 8.2. Trabajo futuro..... | 88 |
| 9. Bibliografía | 89 |
| Anexo A | 93 |
| Anexo B | 96 |
| Anexo C..... | 102 |
| Anexo D..... | 106 |
| Anexo E | 120 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 2.1: Clasificación ondas oceánicas acorde al periodo de onda Munk (1950)..... | 22 |
| Tabla 2.2: Características principales de los modelos MIKE 21 BW y SWASH..... | 30 |
| Tabla 4.1: Condiciones de oleaje modeladas..... | 43 |
| Tabla 5.1: Características fundamentales de los modelos. | 45 |
| Tabla 5.2: Características del modelo SWASH utilizado para la calibración de las capas verticales..... | 53 |
| Tabla 6.1: Comparación entre las altura significativa espectral configurada como condición de borde y la que se obtiene 100 metros delante de la zona de generación con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH..... | 55 |
| Tabla 6.2: Factor de habilidad (ecuación (2.1)) predictiva entre las alturas espectral significativas obtenidas 100 metros delante de la zona de generación de oleaje con la altura espectral significativa configurada en la zona de generación de oleaje..... | 55 |
| Tabla 6.3: Alturas significativas espectrales correspondientes al espectro completo obtenido en el punto P0, para las distintas condiciones modeladas con modelos de, HR Wallingford MIKE 21 BW y SWASH..... | 59 |
| Tabla 6.4: Factor de habilidad predictiva (ecuación (2.1)) para las alturas significativas espectrales del contenido total del espectro, obtenido desde la comparación los tres modelos, HR Wallingford, MIKE 21 BW y SWASH..... | 60 |
| Tabla 6.5: Alturas significativas espectrales correspondientes al contenido de onda larga obtenido en el punto P0, para las distintas condiciones modeladas con modelos de, HR Wallingford MIKE 21 BW y SWASH..... | 61 |
| Tabla 6.6 Factor de habilidad predictiva (ecuación (2.1)) para las alturas significativas espectrales del contenido de onda larga del espectro, obtenido desde la comparación los tres modelos tres modelos, HR Wallingford, MIKE 21 BW y SWASH..... | 61 |
| Tabla 6.7: Relación de la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga en el punto P1 con los parámetros fundamentales del espectro ingresado como condición de borde..... | 71 |
| Tabla 6.8: Relación entre la altura significativa espectral asociada al contenido de onda corta en el punto P1 con la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga de cada uno de los sitios del puerto de San Antonio. | 72 |

Índice de tablas

Tabla 6.9: Frecuencias resonantes determinadas con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH, presentes en la dársena del puerto San Antonio..... 73

Tabla 6.10: Tiempo computacional utilizado por los modelos para el cálculo de las simulaciones..... 76

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Ejemplo de la notación utilizada para enunciar las condiciones de oleaje. | 21 |
| Figura 2.1: Esquema de una onda. | 22 |
| Figura 2.2: Frecuencia y periodo de las ondas oceánicas. Fuente: Munk (1950). | 23 |
| Figura 2.3: Representación gráfica de un grupo de oleaje (línea solida) acompañado por una onda de infragravedad (línea segmentada). Fuente: Alavantas (2015). | 24 |
| Figura 2.4: Esquema de una onda larga unida (línea segmentada) que acompaña al grupo de oleaje (línea solida). Fuente: Hansen et al. (1980). | 25 |
| Figura 2.5: Esquema de una onda de infragravedad libre. Fuente: Hasen et al. (1980). | 25 |
| Figura 2.6: Esquema de ondas de IG unida y reflejadas (<i>leaky wave y edge wave</i>). Fuente: Van Rijn et al. (2011). | 26 |
| Figura 2.7: MIKE 21 BW incluye 2 módulos. El módulo 2DH (panel de la izquierda) es tradicionalmente aplicado para el cálculo de agitación de ondas en puertos. El módulo 1DH (panel de la derecha) es utilizado para el cálculo de la transformación de la ondas desde aguas profundas hacia la costa. Fuente: DHI (2017). | 28 |
| Figura 3.1: Extensión y ubicación del modelo numérico construido para San Antonio. | 35 |
| Figura 3.2: Puntos y sitios de interés. | 36 |
| Figura 3.3: Trayectorias de interés. | 37 |
| Figura 3.4: Determinación de los rangos de frecuencias que definen a los modos resonantes a partir del contenido de onda larga de tres espectros asociados a tres ubicaciones dentro de la dársena del puerto de San Antonio. | 42 |
| Figura 4.1: Espectro de oleaje de la condición de oleaje WC01H2.9T12D274 asociado al punto P0 del modelo. | 44 |
| Figura 5.1: Batimetría de la totalidad de la extensión del modelo. | 46 |
| Figura 5.2: Batimetría de la zona del puerto de San Antonio. | 47 |
| Figura 5.3: Distribución espacial del coeficiente de reflexión de la zona del puerto de San Antonio, utilizado en el modelo SWASH. | 48 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 5.4: Distribución espacial del coeficiente de porosidad de la zona del puerto de San Antonio, utilizado en el modelo MIKE 21 BW. | 49 |
| Figura 5.5: Distribución espacial la capa esponja de la totalidad de la extensión del modelo MIKE 21 BW..... | 50 |
| Figura 5.6: Distribución espacial la capa esponja de la totalidad de la extensión del modelo SWASH..... | 50 |
| Figura 5.7: Distribución espacial del coeficiente de fricción en el dominio del modelo. | 51 |
| Figura 5.8: Coeficiente de fricción de la zona del puerto de San Antonio..... | 52 |
| Figura 5.9: Resultados de la altura significativa espectral del contenido de onda larga promedio según el número de capas configuradas en un modelo de prueba SWASH, los resultados pertenecen a una zona cercana a la zona de generación de oleaje. | 54 |
| Figura 6.1: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 05 (WC05H2.9T16D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3..... | 56 |
| Figura 6.2: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 01 (WC01H2.9T12D274)..... | 57 |
| Figura 6.3: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 02 (WC02H2.9T14D274)..... | 57 |
| Figura 6.4: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 03 (WC03H3.9T14D274)..... | 57 |
| Figura 6.5: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 04 (WC04H4.3T14D274)..... | 58 |
| Figura 6.6: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 05 (WC05H2.9T16D274)..... | 58 |
| Figura 6.7: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 06 (WC06H2.9T18D274)..... | 59 |
| Figura 6.8: Gráfico comparativo de la altura significativa espectral del contenido total del espectro correspondiente a cada una de las condiciones de oleaje modelada en los modelos físicos de HR Wallingford y, modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH..... | 60 |
| Figura 6.9: Gráfico comparativo de la altura significativa espectral del contenido de onda larga del espectro correspondiente a cada una de las condiciones de oleaje | |

| | |
|--|----|
| modelada en los modelos físicos de HR Wallingford y, modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH..... | 61 |
| Figura 6.10: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 62 |
| Figura 6.11: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 63 |
| Figura 6.12: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 63 |
| Figura 6.13: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 64 |
| Figura 6.14: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 64 |
| Figura 6.15: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 65 |
| Figura 6.16: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 66 |
| Figura 6.17: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 66 |
| Figura 6.18: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para | |

la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. 67

Figura 6.19: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. 67

Figura 6.20: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. 68

Figura 6.21: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. 68

Figura 6.22: Relación entre la altura significativa espectral configurado en el espectro que se utiliza como condición de borde y la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga fuera del puerto de San Antonio (Punto P1). 70

Figura 6.23: Relación entre el periodo peak configurado en el espectro que se utiliza como condición de borde y la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga fuera del puerto de San Antonio (Punto P1). 70

Figura 6.24: Relación entre la altura significativa espectral asociada al contenido de onda corta en el punto P1 con la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga del punto P0, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas. 72

Figura 6.25: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. 73

Figura 6.26: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. 74

Figura 6.27: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha

Índice de figuras

| | |
|---|-----|
| corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 74 |
| Figura 6.28: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 75 |
| Figura 6.29: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 75 |
| Figura A.1: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 02 asociado al punto P0 del modelo | 94 |
| Figura A.2: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 03 asociado al punto P0 del modelo | 94 |
| Figura A.3: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 04 asociado al punto P0 del modelo | 94 |
| Figura A.4: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 05 asociado al punto P0 del modelo | 95 |
| Figura A.5: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 06 asociado al punto P0 del modelo | 95 |
| Figura B.1: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 01 (WC01H2.9T12D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3..... | 97 |
| Figura B.2: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 02 (WC02H2.9T14D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3..... | 98 |
| Figura B.3: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 03 (WC03H3.9T14D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3..... | 99 |
| Figura B.4: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 04 (WC04H4.3T14D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3..... | 100 |
| Figura B.5: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 06 (WC06H2.9T18D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3..... | 101 |

Índice de figuras

| | |
|--|-----|
| Figura C.1: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 1, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas..... | 103 |
| Figura C.2: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 2, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas..... | 103 |
| Figura C.3: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 3, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas..... | 104 |
| Figura C.4: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 4, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas..... | 104 |
| Figura C.5: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 5, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas..... | 105 |
| Figura C.6: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 6, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas..... | 105 |
| Figura D.1: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 107 |
| Figura D.2: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 107 |
| Figura D.3: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente..... | 108 |
| Figura D.4: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha | |

Índice de figuras

| | |
|---|-----|
| corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 108 |
| Figura D.5: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 109 |
| Figura D.6: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 109 |
| Figura D.7: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 110 |
| Figura D.8: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 110 |
| Figura D.9: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 111 |
| Figura D.10: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 111 |
| Figura D.11: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 112 |

Índice de figuras

- Figura D.12: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.
.....112
- Figura D.13: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.
.....113
- Figura D.14: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.
.....113
- Figura D.15: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.
.....114
- Figura D.16: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.
.....114
- Figura D.17: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.
.....115
- Figura D.18: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.
.....115
- Figura D.19: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para

Índice de figuras

| | |
|---|-----|
| el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 116 |
| Figura D.20: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 116 |
| Figura D.21: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 117 |
| Figura D.22: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 117 |
| Figura D.23: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 118 |
| Figura D.24: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 118 |
| Figura D.25: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente. | 119 |

Capítulo 1

1. Introducción

1.1. Motivación

De acuerdo con la International Maritime Organization (IMO) más 90% de las mercancías se transportan a través de la vía marítima mediante embarcaciones. El crecimiento de la población mundial y los volúmenes de exportación e importación entre los países, han provocado un aumento en las dimensiones de las embarcaciones que los puertos deben atender.

Años atrás los barcos tenían dimensiones menores y por lo tanto eran menos sensibles al oleaje de onda larga, en cuanto a los movimientos de las embarcaciones. Con el aumento progresivo de las dimensiones de las embarcaciones y el desarrollo de dársenas de geometrías más regulares, el oleaje de onda larga se presenta como un problema recurrente en puertos expuestos a oleaje tipo swell, dado el aumento de los movimientos en las naves.

En Chile es frecuente que embarcaciones que se encuentran atracadas en el puerto no puedan ser atendidas debido a la excitación que generan sobre los barcos las ondas largas y su interacción con la dársena, aún en condiciones en que el oleaje de onda corta (periodo pico¹ menor a 30s) no induce movimientos excesivos en los barcos. Es por esta razón que se deben realizar análisis respecto al comportamiento de ondas largas dentro de las dársenas, y según sea el caso se deben aplicar medidas para disipar dicha onda (López & Iglesias, 2014).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general del presente estudio es evaluar, analizar y comparar resultados de ondas largas obtenidos del modelado realizado con los softwares MIKE 21 BW y SWASH. Se cuenta con resultados en la entrada de la dársena del modelado físico realizado por el laboratorio HR Wallingford², los que permiten validar los modelos e indicar cuál es el que representa de mejor manera las condiciones de ondas largas dentro de la dársena del puerto de San Antonio.

¹ Periodo asociado a la componente de onda más energética en un estado de mar

² La Empresa Portuaria de San Antonio (EPSA), propietaria de los datos obtenidos a partir del modelo físico desarrollado por el laboratorio HR Wallingford, autorizó la utilización de la información para los fines del presente trabajo de título.

1.2.2. Objetivos específicos

- Calibrar cada uno de los modelos con resultados del modelo físico, respecto de oleaje de onda corta disponibles en la entrada de la dársena.
- Comprender el fenómeno de penetración de ondas largas en la dársena del puerto de San Antonio y la interacción de éstas con la geometría de la dársena.
- Comparar los dos modelos numéricos a través del análisis estadístico y análisis de espectros de oleaje obtenidos.
- Establecer razones de proporción entre la energía de oleaje de onda corta fuera de la dársena y oleaje de onda larga dentro de la dársena.
- Evaluar los modelos en cuanto a su capacidad para representar el fenómeno físico de las ondas largas y su interacción con dársenas en proyectos de ingeniería.

1.3. Organización del informe

Los contenidos de cada capítulo se presentan a continuación,

- **Capítulo 2: Revisión bibliográfica**, en este capítulo se presenta el marco teórico utilizado en la comprensión de las ondas largas. Se presentan también estudios relacionados con la penetración de onda larga en diferentes puertos.
- **Capítulo 3: Metodología de análisis**, en este capítulo se presenta la metodología utilizada en el análisis de los resultados obtenidos mediante el modelado con los softwares MIKE 21 BW y SWASH.
- **Capítulo 4: Condiciones de oleaje modeladas**, en este capítulo se presentan los parámetros fundamentales que definen a las condiciones de oleaje simuladas en el presente trabajo.
- **Capítulo 5: Construcción de los modelos**, en este capítulo se presentan la batimetría, porosidad, rugosidad y absorción de energía, que fue utilizadas en el modelado de onda larga con los softwares MIKE 21 BW y SWASH
- **Capítulo 6: Resultados del modelado numérico con MIKE 21 BW y SWASH**, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos del correspondiente modelado con los softwares MIKE 21 BW y SWASH. Se presentan resultados tales como espectros de oleaje, comportamiento de la altura significativa espectral dentro del dominio del modelo y de la dársena, tiempo de cómputo, entre otros.

- **Capítulo 7: Discusión de resultados**, en este capítulo se enuncian y analizan los resultados más relevantes, obtenido con el modelado del puerto de San Antonio mediante los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH.
- **Capítulo 8: Conclusiones**, en este capítulo se presentan las conclusiones de todo lo desarrollado en el presente trabajo de título, centrándose en la comparación de los resultados obtenidos con los dos modelos numéricos.

1.4. Comentarios

En forma de ayuda al lector, el presente trabajo de título desarrolla las secciones respecto a resultados, análisis y conclusiones, conforme al sentido de propagación del oleaje. Adicionalmente dichas secciones se organizan de manera de ir exponiendo resultados cada vez más específicos respecto a la penetración de ondas de infragravedad³.

En el presente trabajo de título fueron simuladas seis condiciones de oleaje mediante los modelos numérico MIKE 21 BW y SWASH. Las seis condiciones de oleaje son definidas con el nombre de WC (por su sigla en inglés, *Wave Condition*) seguido por su respectivo número (ejemplo: WC01). Adicionalmente cuando sea mencionada una de las condiciones de oleaje, será de forma tal que el lector sea capaz de identificar los parámetros fundamentales que definen a dicha condición de oleaje. La Figura 1.1 expone un ejemplo de la notación que se utiliza para enunciar la condición de oleaje número uno. Análogamente se enuncian las demás condiciones de oleaje.



Figura 1.1: Ejemplo de la notación utilizada para enunciar las condiciones de oleaje.

³ Ondas de gravedad de la superficie oceánica con periodos dominantes entre los 30s y los 5 minutos

Capítulo 2

2. Revisión bibliográfica

El oleaje oceánico es una variable fundamental en el diseño y la construcción de obras civiles que son emplazadas en el océano o en la costa. Además, en cuanto a la operación portuaria es fundamental comprender los fenómenos asociados a la interacción de las embarcaciones con el oleaje, por ejemplo en la dársena de un terminal portuario. Las ondas del océano (u olas) son descritas por su periodo (T), amplitud (a), longitud de onda (L) y dirección (D). La Figura 2.1 esquematiza una onda oceánica general, esta indica las variables que definen a una onda en dos dimensiones ($2D$).

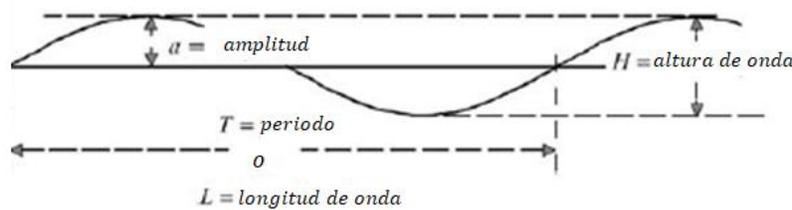


Figura 2.1: Esquema de una onda.

Existen distintas formas de clasificar el oleaje, siendo lo más común clasificarlo según su periodo o su longitud de onda. En la Tabla 2.1 se adjunta la clasificación de ondas según su periodo, además se mencionan las forzantes que originan y las que disipan las ondas. Adicionalmente, en la Figura 2.2 se presenta un espectro de energía de ondas idealizado, el cual contienen el rango completo de componentes de las ondas oceánicas.

Tabla 2.1: Clasificación ondas oceánicas acorde al periodo de onda Munk (1950).

| Clasificación | Rango de periodo | Fuerzas generadoras | Fuerzas restitutivas |
|---------------------------|------------------|--|--------------------------------|
| Ondas capilares | < 0.1 s | Viento | Tensión superficial |
| Ondas de ultragravedad | 0.1-1 s | Viento | Tensión superficial y gravedad |
| Ondas de gravedad | 1-30 s | Viento | Gravedad |
| Ondas de infragravedad | 30 s to 5 min | Viento y gradientes de presión atmosférica | Gravedad |
| Ondas de periodo largo | 5 min to 12 h | gradientes de presión atmosférica y terremotos | Gravedad |
| Ondas mareales ordinarias | 12-24 h | Atracción gravitacional | Gravedad y fuerza de coriolis |
| Ondas transmareales | >24 h | Tormentas y atracción gravitacional | Gravedad y fuerza de coriolis |

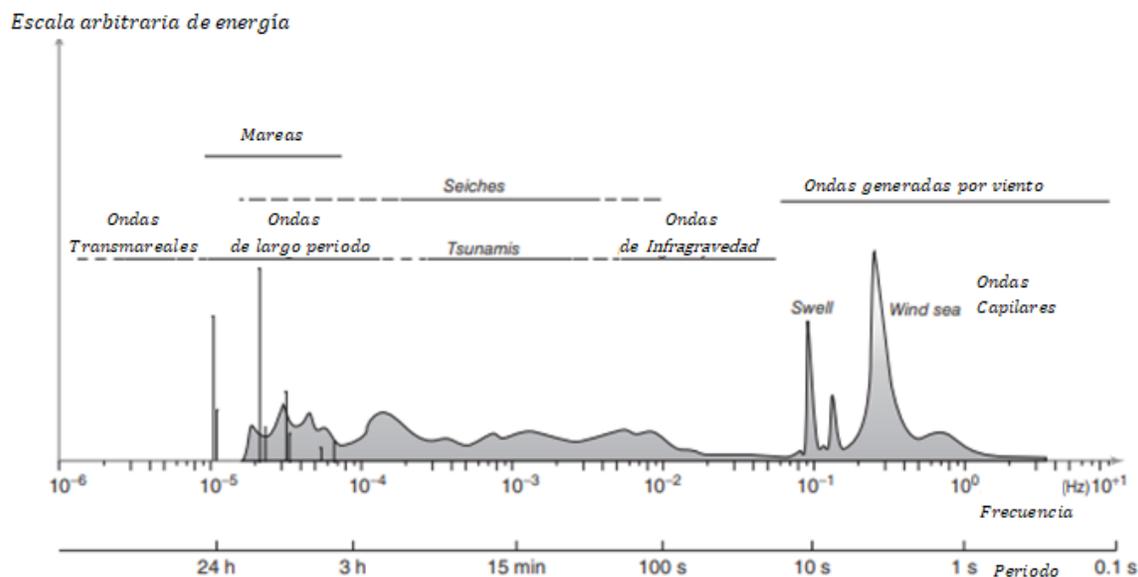


Figura 2.2: Frecuencia y periodo de las ondas oceánicas. Fuente: Munk (1950).

Para efectos del desarrollo del presente trabajo de título, se profundizará en las ondas de infragravedad (IG). Se debe tener en consideración que técnicamente las ondas de infragravedad son simplemente una subcategoría de las ondas de gravedad y se refieren a las ondas con periodos mayores a 30 segundos. Así esta definición incluye fenómenos tales como las mareas y ondas oceánicas Rossby, pero el uso científico común se limita a ondas de gravedad que son generadas por la interacción que existe entre las ondas de un grupo de oleaje, dichas ondas tienen periodos entre 1 a 30 segundos. Por lo tanto, en la primera sección de la presente revisión bibliográfica se define la onda de infragravedad, y se presentan los modos de generación y disipación de éstas. En una segunda sección se exponen los modelos con los cuales será simulado el fenómeno que se encuentra bajo análisis. En esta sección se enuncia el modo de operación, los fenómenos que simulan los modelos y los supuestos bajo los cuales los modelos están configurados. En una tercera sección se exponen estudios de modelado y análisis de onda de infragravedad en distintos puertos. Se enuncia el objetivo principal de los estudios, el modelo utilizado en el estudio y la relevancia de los resultados obtenidos por la investigación. En una última sección se enuncia la relevancia del desarrollo del presente estudio.

2.1. Onda de infragravedad

2.1.1. Definición

Las interacciones no lineales que ocurren entre las distintas componentes del oleaje de gravedad (denominadas de esta forma debido a que la fuerza restitutiva de la superficie libre correspondiente es la gravedad) generada por viento convierten parte de la energía en ondas subarmónicas con periodos aproximadamente en el rango de

30 segundos a 5 minutos (Herbers et. al, 1995a). Las ondas largas (de esta manera se les denomina comúnmente a las onda de largo periodo) que acompañan a los grupos de oleaje de ondas de gravedad (ondas cortas), son conocidas como ondas de infragravedad. La Figura 2.3 es una representación de grupos de oleaje de onda corta que son acompañados por una onda de infragravedad.

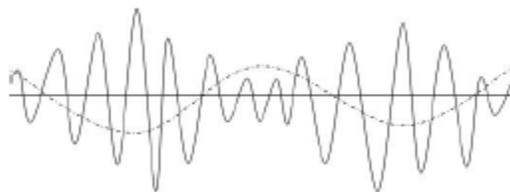


Figura 2.3: Representación gráfica de un grupo de oleaje (línea sólida) acompañado por una onda de infragravedad (línea segmentada). Fuente: Alavantas (2015).

Existen 2 tipos de onda de infragravedad, la onda unida (*bound wave*) y la onda libre (*free wave*). La diferencia entre ambas ondas radica en el proceso de generación que tienen. Dicho modo de generación se abordará en la sección siguiente.

Las ondas de infragravedad tienen múltiples efectos en el ámbito de la ingeniería de costas. Entre ellos, procesos de transporte de sedimentos a nivel de costa y, procesos y actividades costeras, tales como la operación portuaria y las líneas de amarre de las embarcaciones, debido a oscilaciones que este tipo de ondas pueden generar dentro del puerto (Masterton & Ewans, 2008). Para efectos del desarrollo del presente trabajo de título, el objetivo principal es estudiar, analizar y comparar los resultados obtenidos por los modelos MIKE 21 BW y SWASH respecto a las ondas de infragravedad, considerando como escenario el puerto de San Antonio.

2.1.2. Generación

Como se expuso en la sección anterior existen dos tipos de onda de infragravedad, las que se diferencian por el modo de generación que tiene cada una de ellas. La primera se denomina onda de infragravedad unida (*bound wave*). Ésta es asociada a un grupo de oleaje y se genera debido al gradiente del flujo de momento que existe en los grupos de oleaje. El gradiente induce que la masa de agua se aleje del grupo, gatillando esto, a su vez, una reducción en la superficie libre de las ondas más grandes del grupo y un aumento en la superficie libre de las ondas más bajas del grupo. Este fenómeno tiene como consecuencia la formación de una onda larga, la cual se conoce como onda de infragravedad unida (Longuet-Higgins et al., 1962). Esta onda viaja en conjunto con el grupo de oleaje, a la misma velocidad de este último en dirección hacia la costa. La Figura 2.4 representa el tipo de onda descrita.

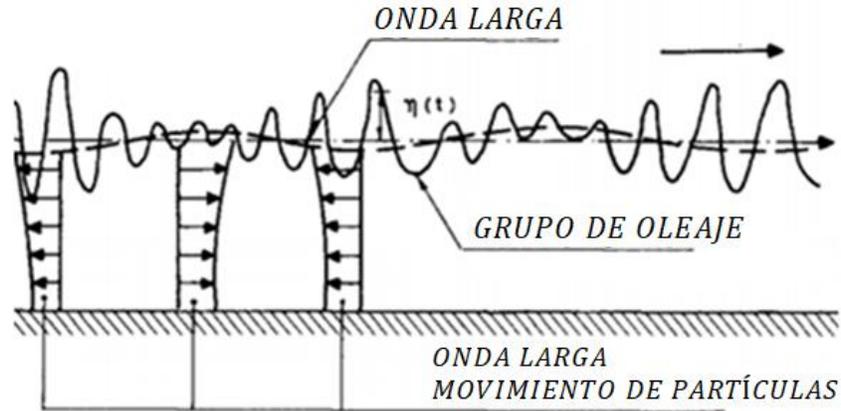


Figura 2.4: Esquema de una onda larga unida (línea segmentada) que acompaña al grupo de oleaje (línea sólida). Fuente: Hansen et al. (1980).

Un segundo tipo de onda de infragravedad, se desarrolla más cerca de la zona costera o en agua someras. El oleaje incidente disipa su energía en forma de ruptura, la cual es inducida por la interacción que existe entre el fondo y el oleaje en la zona de rompiente. De este modo se liberan componentes de infragravedad menos energéticas, que ya no acompañan al grupo de oleaje (que se disipó por rotura), por lo que se definen como ondas libres (*free wave*). Es importante mencionar que la baja amplitud que presenta este tipo de ondas no permite que se genere la rotura de estas, por lo tanto, la onda se propaga hacia la orilla hasta que se refleja. La Figura 2.5 presenta un esquema del tipo de onda descrita (Toffoli & Bitner-Gregersen, 2017).

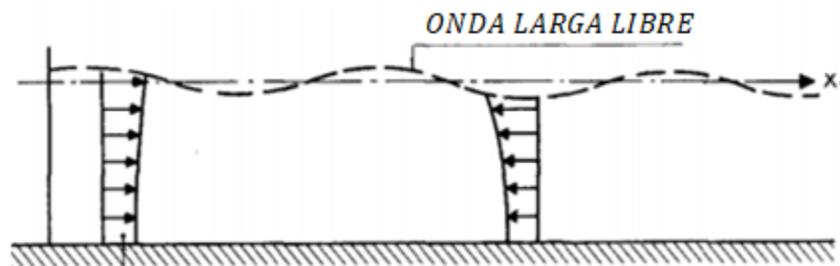


Figura 2.5: Esquema de una onda de infragravedad libre. Fuente: Hasen et al. (1980).

La baja amplitud que caracteriza a las ondas de IG libres permite a estas reflejar gran parte de su energía. La onda de infragravedad reflejada, en algunos casos se propaga hacia aguas profundas, mientras que en otros queda atrapada en la zona de *surf*. A estas ondas se les denomina *leaky waves* y *Edge waves*, respectivamente (Van Rijn, 2011). En la Figura 2.6 se presenta de manera gráfica las ondas denominadas *leaky waves* y *edge wave*.

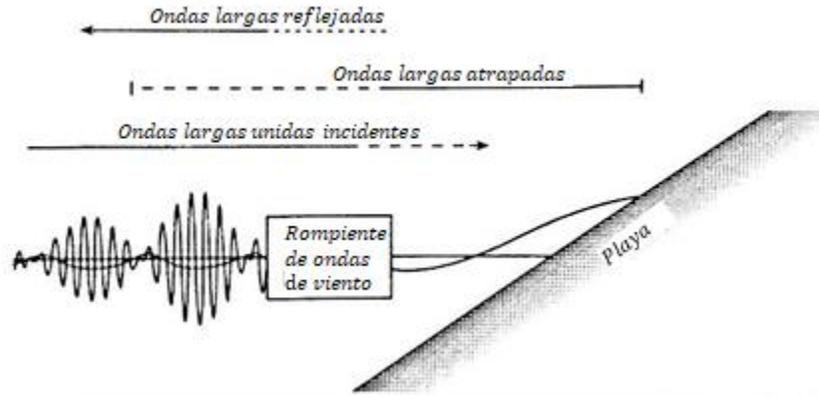


Figura 2.6: Esquema de ondas de IG unida y reflejadas (*leaky wave* y *edge wave*). Fuente: Van Rijn et al. (2011).

2.1.3. Disipación

En aguas poco profundas cercanas a la costa, la energía de las ondas de infragravedad se disipa. La disipación de energía de este tipo de ondas está asociada a tres procesos.

El primero de ellos fue estudiado por Thomson et al. (2006). Dicho estudio determina que existe la posibilidad que la onda de infragravedad reflejada transfiera parte de su energía a grupos de ondas cortas. Este fenómeno ocurre en la zona de *surf*, antes del punto donde rompen las olas. Una parte de esta energía transferida es disipada cuando las ondas cortas incidentes rompen.

Otro mecanismo de disipación fue estudiado por Van Dongeren et al. (2007), y corresponde a la disipación por rompimiento de las ondas de infragravedad.

El último mecanismo de disipación, según Henderson & Bowen (2002), se debe a la interacción de la onda con el fondo marino, el cual tiene rugosidad por lo cual ejerce una fuerza resistiva contra el flujo de agua.

2.2. Modelos numéricos

En la presente sección se describen los modelos que serán utilizados para reproducir la propagación de ondas de infragravedad al puerto de San Antonio. Se describe la funcionalidad de estos, los fenómenos que los modelos son capaces de reproducir, y se enuncian el tipo de ecuaciones sobre los cuales trabaja cada uno de los modelos. Los modelos que serán utilizados son MIKE 21 BW y SWASH.

En el rubro de la ingeniería de costas son utilizados variados modelos numéricos capaces de simular la propagación de oleaje y procesos morfológicos. Los principales tipos de modelos numéricos disponibles son:

- *Phase-average models* (Modelos de fase promediada)

- *Phase-resolving-models* (Modelos solucionador de fase)

Los modelos de fase promediada no son capaces de calcular la elevación de la superficie libre del agua en una posición exacta. Estos son capaces de predecir la variación promedio (o energía) de la elevación de superficie. Los resultados de un modelo de fase promediada corresponden a parámetros integrales del espectro de oleaje, como lo es la altura significativa espectral. Estos modelos utilizan las ecuaciones de balance de energía para describir la evolución espectral. También se debe mencionar que el gasto computacional asociado a la simulación es bajo. Cabe destacar que estos modelos descuidan procesos relevantes en la propagación de oleaje, tales como la difracción, reflexión e interacciones no lineales, esta última explica por qué estos modelos no son capaces simular con precisión las ondas de infragravedad (Alavantas, 2015).

Los modelos de resolución de fase son capaces de calcular la elevación de superficie en el tiempo y espacio. Estos modelos utilizan uno de estos cuatro tipos de ecuaciones:

- Ecuaciones promediadas de Reynolds Navier Stokes (RANS, por su nombre en inglés)
- Ecuaciones de Boussinesq
- Ecuaciones no lineales de aguas someras (NSWE, por su nombre en inglés)
- Ecuaciones de pendiente leve

Para efectos del presente trabajo de título, se utilizarán dos modelos numéricos del tipo *nonlinear phase-resolving* (solucionador de fase no lineal) para el modelado de la penetración de ondas de infragravedad en la dársena del puerto de San Antonio. El modelo MIKE 21 BW (DHI, 2009) y el modelo SWASH (Zijlema et al., 2011). Estos modelos se basan en las ecuaciones de Boussinesq y NSWE, respectivamente.

2.2.1. MIKE 21 BW

MIKE 21 BW es un modelo numérico de oleaje, del tipo *phase resolving* que se basa en las ecuaciones mejoradas de Boussinesq. Éste ha sido desarrollado por la empresa DHI y es un modelo altamente comercializado en la industria de la ingeniería de costas.

El modelo cuenta con dos módulos, *2DH Boussinesq Wave Module (Two horizontal space coordinate)* y *1DH Boussinesq Wave Module (One horizontal space coordinates)*. Ambos módulos resuelven las ecuaciones mejoradas de Boussinesq, esto al utilizar una formulación de flujos, y así mejorar la dispersión de frecuencias

simulada. La resolución de las ecuaciones de Boussinesq mejoradas permite que los modelos sean adecuados para la propagación de oleaje desde aguas profundas hacia la costa. En la Figura 2.7 se pueden observar los módulos descritos anteriormente. Para efectos del presente trabajo de título se utilizó el módulo 2DH.

El modelo utilizado es adecuado para la simulación de ondas largas debido a que es capaz de predecir las interacciones no lineales de las ondas, las cuales son responsables de la dispersión de frecuencia que a su vez generan las ondas largas (Kofoed et al., 2005)

El modelo reproduce efectos combinados de fenómenos de oleaje que son relevantes para el área de la ingeniería de costas, tales como:

- Asomeramiento
- Refracción
- Difracción
- Rompiente de oleaje
- Disipación en el fondo
- Reflexión parcial
- Propagación de oleaje
- Interacción no lineal de onda-onda

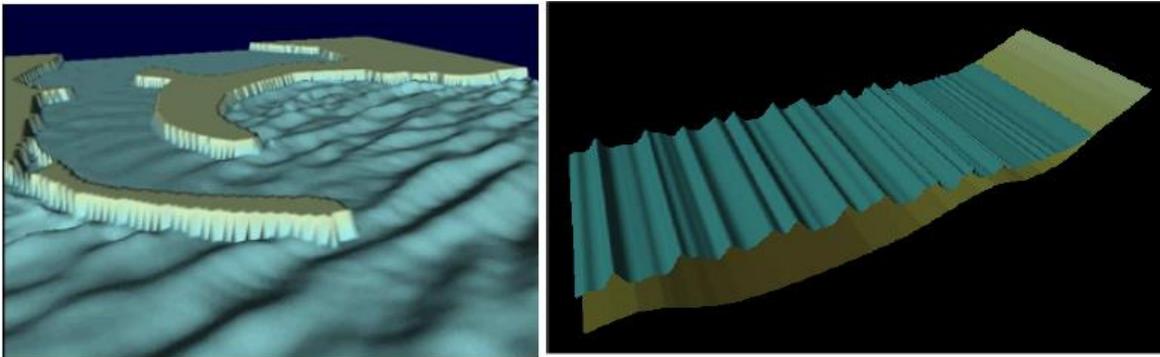


Figura 2.7: MIKE 21 BW incluye 2 módulos. El módulo 2DH (panel de la izquierda) es tradicionalmente aplicado para el cálculo de agitación de ondas en puertos. El módulo 1DH (panel de la derecha) es utilizado para el cálculo de la transformación de las ondas desde aguas profundas hacia la costa. Fuente: DHI (2017).

Para mayor detalle respecto a las ecuaciones, condiciones, limitaciones y otras especificaciones, referirse al documento del DHI (2017).

2.2.2. SWASH

SWASH es un modelo numérico de propagación de oleaje del tipo *phase-resolving*, que se basa en las ecuaciones NSWE y considera también presión no hidrostática. Este ha sido desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft y es de código abierto.

El modelo es adecuado para el estudio de ondas largas, ya que se basa en las ecuaciones NSWE, las que logran representar la generación de ondas largas debido a la ruptura del oleaje. Al considerar el término de presión no hidrostática en las ecuaciones, el modelo es capaz de incorporar la dispersión de frecuencia, la cual a su vez hace posible el cálculo de la transformación de las ondas desde aguas profundas hacia la costa (Suzuki et al., 2012).

El modelo reproduce variados fenómenos físicos, los cuales son relevantes en el diseño, construcción y manejo de obras civiles localizadas en ambientes costeros. Algunos de estos fenómenos se encuentran enlistados a continuación (The SWASH team, 2019):

- Propagación de oleaje, dispersión de frecuencia, asomeramiento, refracción y difracción
- Interacción no lineal onda-onda
- Rompiente de oleaje
- Run-up onda y run-down onda
- Interacción onda-estructura
- Interacción onda-corriente
- Corrientes inducidas por oleaje

Para mayor detalle respecto a las ecuaciones, condiciones, limitaciones y otras especificaciones, referirse al documento del The SWASH team (2019).

2.2.3. Características Principales de los Modelos

En la siguiente sección se adjunta la Tabla 2.2, la cual expone las principales características de cada uno de los modelos.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

Tabla 2.2: Características principales de los modelos MIKE 21 BW y SWASH.

| Característica | MIKE 21 BW | SWASH |
|---|---|--|
| Tipo | Modelo de resolución de fase | Modelo de resolución de fase |
| Ecuación | Ecuaciones mejoradas de Boussinesq | Ecuaciones no lineales de aguas poco profundas |
| Grilla | Rectangular, resolución computacional de la grilla es la misma resolución de la grilla de batimetría | Rectangular y curvilínea, la resolución computacional puede diferir de la resolución de la grilla de batimetría |
| Flujo Rotacional | Flujo irrotacional | Flujo rotacional |
| Presión | La presión no hidrostática es incluida a través de la consideración de términos de ordenes mayores de las ecuaciones de aguas poco profundas | Hidrostática como también no hidrostática |
| Estructura vertical de velocidad | Impuestas en las ecuaciones, no son parte de la solución | Incluidas en las ecuaciones, son parte de la solución |
| Procesos incluidos | Los dos modelos incluyen fenómenos de oleaje relevantes para la aplicación en el área de puertos y canales de entrada, dentro de los procesos se encuentran: transmisión de ondas, dispersión de frecuencia, asomeramiento, refracción, reflexión, difracción, rompiente de oleaje, interacción no lineal entre olas, disipación por el fondo, entre otros. | |
| Generación de onda | Generación en borde abiertos o en una línea interna de generación | Generación en bordes abiertos |
| Máximo radio kd^* | Máximo valor de $kd < 3.1$ | El máximo valor de kd depende de la cantidad de capas verticales, para dos capas verticales, $kd < 7.7$ |
| Reflexión y transmisión parcial | Especificación de valores de porosidad en los límites donde se requiera transmisión parcial y/o reflexión. Además, se define un diámetro constante del elemento poroso. | Especificación de valores de reflexión en los límites donde se requiera transmisión parcial y/o reflexión. Además, se define un diámetro variable del elemento poroso. |
| Valor | 20,000 EUR/ mes ** | Software de código abierto (gratuito) |
| * kd es la relación entre el número de onda(k) y la profundidad media del agua (d). | | |
| ** El valor es proporcionado por la empresa PRDW ⁴ . | | |

⁴ Empresa de ingeniería de costas con la que se trabajó en conjunto. <http://www.prdw.com/>

2.3. Estudios similares de onda de infragravedad en otros Puertos

2.3.1. Puerto de Ngquar, Sudáfrica

El puerto de Ngquar se encuentra operacional desde 2009. Se ubica en la costa este de Sudáfrica en la bahía de Algoa.

Según lo documentado en el estudio de Stuart et al. (2014), desde el primer invierno operacional del puerto de Ngquar, se presentaron movimientos excesivos en los barcos atracados, lo que provocó un aumento en las tensiones y en algunas ocasiones cortes de las líneas de amarre, así provocando una interrupción en la operación del puerto. Una componente que contribuye en los movimientos de las embarcaciones puede ser la resonancia del puerto debido a la penetración de ondas largas en el puerto.

Stuart et al. (2014) desarrolló un estudio motivado en los excesivos movimientos de los barcos que eran atendidos en el puerto de Ngquar. Para ello comparó mediciones de terreno con resultados de simulaciones realizadas con el modelo MIKE 21 BW. Para cada uno de los eventos simulados, la perturbación inducida por onda larga entregada por el modelo fue comparada con mediciones de terreno. El estudio concluye que los resultados de las simulaciones son consistentes con las mediciones, esto debido a que la diferencia entre los resultados y los datos es cercana al 10%. Con ello el modelo Boussinesq es una herramienta capaz de reproducir de buena manera el fenómeno de ondas largas dentro de un puerto.

2.3.2. Puerto de Sines, Portugal

El puerto de Sines se ubica en la costa atlántica de Portugal, aproximadamente a 100 km al sur de Lisboa.

Según lo expuesto en el estudio de Gierlevsen et al. (2001), posterior a la construcción de la extensión del terminal multipropósito del puerto de Sines, el puerto presentó problemas en las líneas de amarre en los sitio de atraque de uno de sus sectores. Estos tuvieron lugar durante la tormenta ocurrida en diciembre de 1998. La razón a la cual se atribuye este hecho es la construcción de la extensión del terminal multipropósito, produciendo esta un aumento en las perturbaciones en el sector de atraque.

Gierlevsen et al. (2001) desarrolló un estudio, el cual tiene por objetivo principal comparar en las diferentes configuraciones en el diseño de la forma del puerto, la perturbación de la superficie libre generada por la penetración de la onda larga en la dársena del terminal multipropósito. El análisis pone énfasis en la configuración antes y después de la construcción de la extensión del muelle realizada entre 1998 y 1999. Para las diferentes configuraciones, el estudio simuló las condiciones de oleaje presentes durante la tormenta que provocó los incidentes en diciembre de 1998, y

además simuló potenciales condiciones generadoras de oscilación por onda larga. El estudio realizó las simulaciones con el modelo MIKE 21 BW.

La investigación concluye que la construcción de la extensión del muelle contribuyó significativamente al crecimiento de la perturbación de la superficie libre, inducida por onda corta y onda larga, presente en la dársena.

2.3.3. Puerto de Thorsminde, Dinamarca

El Puerto de Thorsminde es un puerto pesquero que se ubica en la costa oeste de Dinamarca, el cual está expuesto al mar del norte.

Según lo documentado en el estudio de Kofoed et al. (2005), inmediatamente después de la construcción del diseño original de entrada del puerto, en otoño de 1990, oscilaciones significativas de baja frecuencia fueron reportadas por la autoridad portuaria. Estas generaron un movimiento de vaivén en los barcos atracados, provocando así una rotura de las líneas de amarre.

Kofoed et al. (2005) desarrolló un estudio respecto a la perturbación de la superficie libre del puerto debido a la componente de baja frecuencia del oleaje. El estudio simuló la situación del puerto con la configuración existente en el puerto cuando se reportan las oscilaciones debido a onda de baja frecuencia y la situación después de la construcción del nuevo diseño de entrada al puerto. Las simulaciones fueron realizadas en el modelo MIKE 21 BW.

Mediante el modelado, el estudio concluyó que la ocurrencia de ondas de infragravedad es causada por la interacción no lineal con las olas de onda corta. También establece que existe una relación consistente entre la situación simulada y las mediciones de campo disponible. Así, concluye que un modelo Boussinesq es capaz de reproducir las características no lineales para las ondas de rompiente y no rompiente, las cuales son responsables de la oscilación de onda larga en algunos puertos del mundo.

2.3.4. Puerto de Barbers Point, Estados Unidos

El puerto de Barbers Point se encuentra cerca de la ciudad de Makakilo en la isla de Oahu, Hawaii, Estados Unidos. El puerto se encuentra expuesto al oleaje del océano Pacífico.

Alavantas (2015) estudió en su trabajo de tesis de magister la evolución de las ondas de IG en un dominio de dos dimensiones. Realizó esto con la finalidad de comprender la influencia de los fenómenos como la refracción y difracción en la evolución de las ondas de IG, que hasta ese entonces no habían sido estudiadas con profundidad. La gran mayoría de las investigaciones estudiaban la evolución de las ondas de IG a través de un modelo unidimensional. El análisis desarrollado por Alavantas (2015)

fue realizado mediante el modelo numérico SWASH, utilizando como escenario el puerto de Barbers Point. Para la validación de dicho modelo el estudio realizó la comparación de este contra mediciones de campo.

Mediante la comparación entre las alturas significativas espectrales del contenido de onda larga obtenida desde mediciones y del modelado numérico, el estudio concluye que el modelo numérico SWASH es capaz de obtener resultados consistentes con los resultados empíricos. Esto se justifica con un alto valor del factor promedio de habilidad predictiva (0.84) respecto a las alturas significativas espectrales del contenido de onda larga. El factor indica la diferencia entre los resultados empíricos y los obtenidos mediante modelos numéricos. Cuando la diferencia entre los resultados es nula el valor del factor es igual a 1, por otro lado cuando la diferencia es mayor el valor se acerca a cero. El factor de habilidad predictiva queda definido en la ecuación (2.1).

$$\text{Skill} = 1 - \sqrt{\frac{(H_{IG,\text{sig,medido}} - H_{IG,\text{sig,calculado}})^2}{H_{IG,\text{sig,medido}}^2}} \quad (2.1)$$

2.3.5. Marina de Blankenberge, Bélgica

La marina de Blankenberge se encuentra en la ciudad de Blankenberge y se encuentra expuesta al oleaje del mar del Norte.

Suzuki et. al (2012) en su investigación evaluó el funcionamiento de los muros de contención (diques) alrededor de la marina de Blankenberge, en dos escenarios extremos: una tormenta con periodo de retorno de 1000 años y una súper tormenta de +8 [m]. Ambos escenarios fueron modelados con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH. La investigación utiliza ambos modelos con el objetivo de estudiar a cabalidad la penetración del oleaje en la marina de Blankenberge y así contribuir en el nuevo diseño de los diques. La investigación validó ambos modelos numéricos con mediciones de campo.

La investigación de Suzuki et. al (2012) concluye, a través de la validación de los modelos, que estos generalmente son capaces de predecir de buena manera la penetración de las oleaje y las ondas largas.

2.4. Comentarios

A través de la realización de la presente revisión bibliográfica se identifica y asevera la existencia de problemas relacionados con la penetración de ondas largas en la dársena de algunos puertos. En general, estos problemas están asociados a la

excitación de las embarcaciones, la cual es inducida por la penetración de las ondas largas en la dársena. Dicha excitación se traduce a su vez en movimientos excesivos en las embarcaciones que están siendo atendidas en los puertos, así aumentando el *downtime*⁵ del puerto. En algunas ocasiones dichos movimientos generan la rotura de las líneas de amarre de las embarcaciones.

Hoy en día las herramientas utilizadas para estudiar la penetración de ondas largas en dársenas, son mediciones de campo y, los modelos físicos y numéricos. Estos últimos son altamente utilizados, debido a la alta velocidad de cálculo, la multiplicidad de casos que pueden ser simulados y la alta precisión que estos tienen. Por otra parte, existe incertidumbre en cuanto al ajuste de los resultados de estos respecto a las mediciones de campo. Es por ello que es de gran interés conocer qué modelo obtiene los resultados que mejor se ajustan a las mediciones del fenómeno bajo análisis. En vista de lo anterior, el presente trabajo de título compara los resultados de onda larga de los modelos MIKE 21 BW y SWASH.

Ambos modelos utilizados en el presente trabajo son del tipo *phase resolving*, así siendo capaces de simular la generación y propagación de las ondas largas. Los modelos trabajan en base a distintas ecuaciones, pero la diferencia más relevante en el contexto del presente estudio es la metodología que emplean para simular el fenómeno de dispersión de frecuencia, el cual está relacionado con la generación de ondas largas. Según la bibliografía estudiada la metodología utilizada por el modelo SWASH para la simulación de la dispersión de frecuencia podría obtener resultados más precisos (según el número de capas que sean configuradas) que los del modelo MIKE 21 BW. Con esto se espera que los resultados del modelo SWASH se ajusten mejor a los resultados disponibles desde el modelado físico realizado por HR Wallingford, que los resultados del modelo MIKE 21 BW.

Los modelos construidos para el presente estudio simulan la situación actual del puerto de San Antonio, Chile. Se selecciona el puerto de San Antonio, debido a la relevancia nacional que tiene y la disponibilidad de datos para validar los modelos. Además se tiene conocimiento de que dicho puerto presenta problemas asociados a onda larga, esto lo ha comunicado EPSA al grupo de ingenieros del área de hidráulica de la empresa PRDW.

⁵Tiempo en que el puerto se encuentra inoperativo, debido a problemas operacionales o condiciones de oleaje que no permiten la operatividad de este.

Capítulo 3

3. Metodología de análisis

3.1. Introducción

Para la comparación de los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH, se generan variados resultados relacionados con la altura significativa espectral, tanto del contenido total de las frecuencias del espectro, como del contenido de frecuencias bajas. En el presente capítulo se describe la metodología de análisis que se realizó sobre los resultados obtenidos desde los modelados realizados con MIKE 21 BW y SWASH.

3.2. Modelo y puntos de interés

En la Figura 3.1 se presenta la extensión del modelo numérico construido para efectos del presente trabajo de título. Se aprecia también la ubicación del modelo considerando como referencia las ciudades de San Antonio y Cartagena.

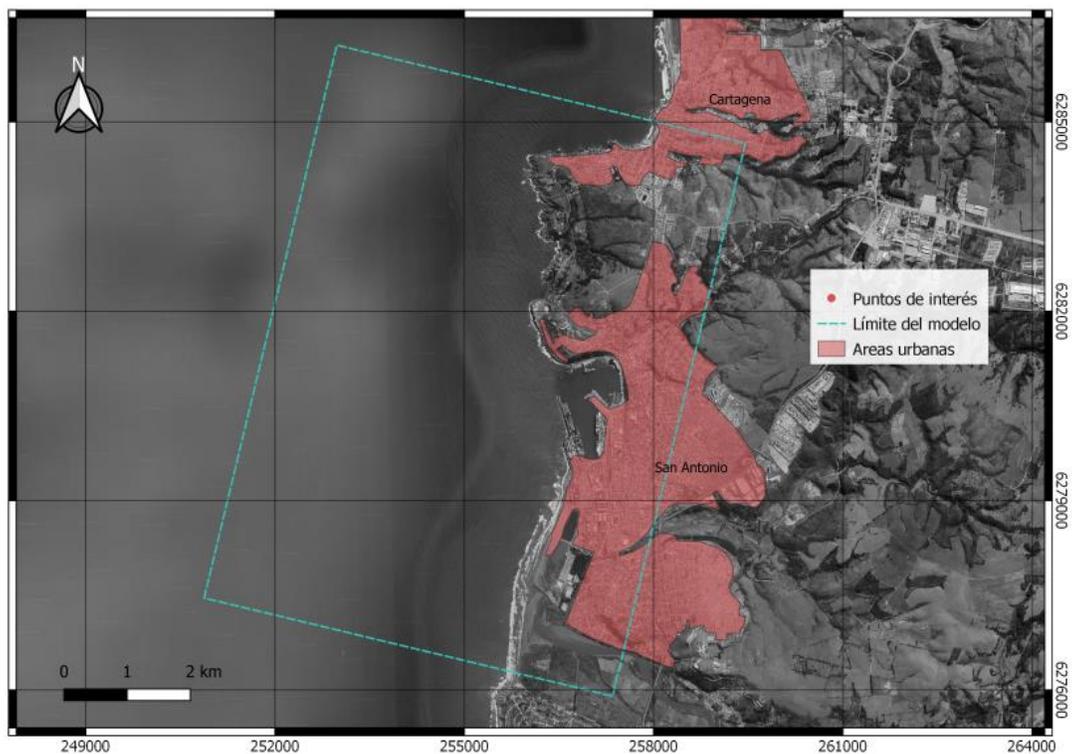


Figura 3.1: Extensión y ubicación del modelo numérico construido para San Antonio.

En la Figura 3.2 se presenta 10 puntos y algunos sitios de atraque de interés que fueron definidos para la elaboración del correspondiente análisis. En el punto definido como P0, existe información disponible respecto a las series de tiempo de superficie

libre. Estas se obtienen a partir del modelado físico realizado por el laboratorio de HR Wallingford. Los resultados en dicho punto se utilizarán para la validación de los modelos. Los nueve puntos restantes definen trayectorias de interés, estas se aprecian en la Figura 3.3. Dichas trayectorias tienen como finalidad analizar y comparar ambos modelos en cuanto a los procesos de propagación del oleaje que simulan ambos modelos numéricos a lo largo de estas trayectorias.

Cabe mencionar que el modelado físico realizado por HR Wallingford, desde el cual se obtiene la información de superficie libre en el punto P0, fue desarrollado en el contexto de la evaluación del diseño del rompeolas y operatividad del proyecto Puerto a Gran Escala (PGE) será emplazado en la ciudad de San Antonio.



Figura 3.2: Puntos y sitios de interés.

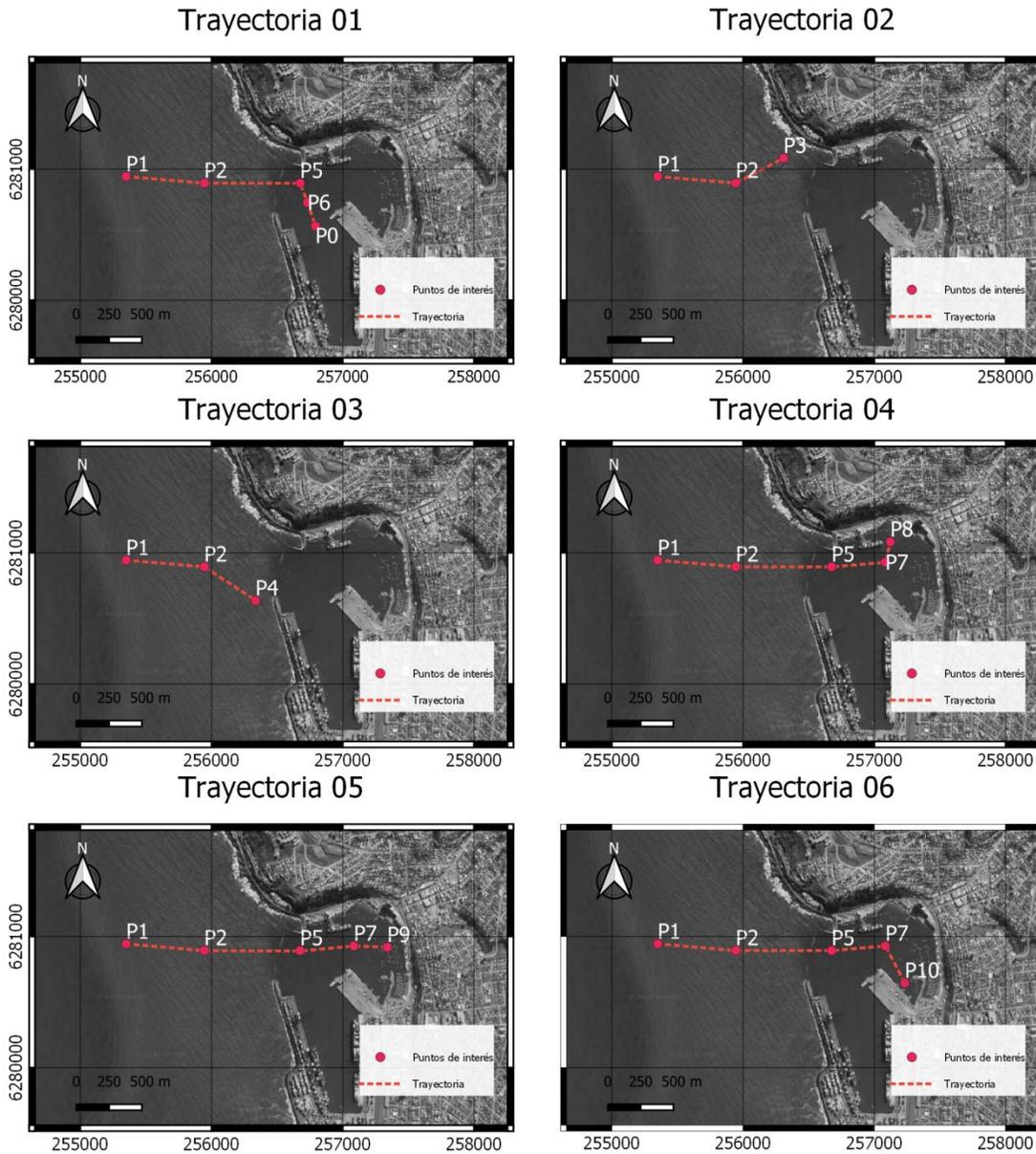


Figura 3.3: Trayectorias de interés.

3.3. Espectro de frecuencia

Los espectros de frecuencia son una representación del oleaje en cuanto a la distribución de la energía en un rango de frecuencias. Permiten identificar cuáles son las frecuencias del oleaje que concentran mayor o menor energía y cuan amplia es la dispersión con respecto a la o las frecuencias principales (Beyá et al., 2016). Por ello los espectros de frecuencia son utilizados como herramienta de análisis de resultados y comparación entre modelos sobre los puntos definidos de interés (Figura 3.2).

Los espectros de frecuencias son obtenidos a través de la aplicación de la transformada de Fourier sobre la serie de tiempo de superficie libre, en cada uno de los puntos de interés. De esta manera se puede obtener la cantidad de energía asociada a cada una de las frecuencias presentes en la serie de tiempo de superficie libre.

Los espectros de frecuencia obtenidos a partir de los resultados de superficie libre de los modelos numéricos y del modelo físico se obtienen dividiendo la serie de tiempo de superficie libre de cada uno de los puntos de interés en una cierta cantidad de sub-series de tiempo. Sobre estas se aplica la transformada de Fourier y así se obtiene un espectro de frecuencia por cada una de las sub-series de tiempo. Los espectros obtenidos de cada una de las sub-series se promedian entre sí y con esto se obtiene el espectro de frecuencia asociado a la totalidad de la serie de tiempo de superficie libre original.

La cantidad de sub-series en las que se divide la serie original de superficie libre es configurada por el usuario. Dicha configuración se realiza considerando que al dividir la serie original en una mayor cantidad de sub-series se obtendrá un resultado más preciso del espectro de frecuencia. Por otro lado la magnitud de la frecuencia mínima obtenida en el espectro es mayor al dividirse la serie original en una cantidad mayor de sub-series.

Para efectos del análisis de ondas largas la frecuencia mínima habitualmente requerida en los espectros debe ser al menos 0,003 [Hz]. Teniendo en consideración esto y lo explicitado en el párrafo anterior, el procedimiento para obtener todos los espectros contenidos en el presente trabajo de título, se configura con una cantidad de 16 divisiones de las series de tiempo de superficie libre (16 sub-series).

3.4. Altura significativa espectral asociada al contenido total y de onda larga

La altura significativa espectral es un parámetro que indica la energía total en algún punto o sector en específico. Este parámetro es altamente utilizado en el rubro de la ingeniería de costas. En el contexto del presente trabajo de título se utiliza como parámetro comparativo entre los modelos e indicador de sectores de alto y bajo contenido de energía.

La altura significativa espectral es calculada a partir de los espectros, siguiendo la definición presentada en la ecuación (3.1). Para mayor detalle respecto a esta definición consultar Holthuijsen (2007).

$$H_{m0} \approx 4 \sqrt{\int_0^{\infty} E(f) df} \quad (3.1)$$

- Donde $E(f)$ es la variación de la densidad de espectro, esta función define al espectro de oleaje.

Los valores de altura significativa espectral asociado a cada uno de los modelos numéricos y al modelo físico, se obtienen a través de los espectros de frecuencia los que a su vez se obtienen mediante la aplicación del proceso descrito en la sección 3.3. La altura significativa espectral asociada al contenido total de frecuencias se obtiene integrando la función que define al espectro, lo anterior se representa mediante la ecuación (3.1).

La altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga se obtiene integrando el espectro de frecuencia considerando 0.033 y 0.0033 [Hz] como límites de la integral de la ecuación (3.1). Se consideran dichos valores de frecuencia como límites de la integral debido a la definición de onda larga.

3.5. Comparación de propagación

Es de interés comprender cuales son las diferencias entre los modelos en cuanto a los procesos de propagación del oleaje, tales como la difracción refracción, y asomeramiento.

Previo a la comparación de los procesos de propagación de oleaje, se determina el nivel de energía que hay cerca de la zona de generación de oleaje, esto se realiza con la finalidad de cuantificar la cantidad de energía que ingresa al modelo en cada una de las configuraciones. Por otro lado en pos de comprender las diferencias de los procesos de propagación que están incorporados por ambos modelos, se definen seis trayectorias de interés (Figura 3.3).

La cantidad de energía que ingresa en los modelos de propagación de oleaje es fundamental y debe ser considerado en el análisis de los resultados obtenidos con el respectivo modelado. Para efectos de reducción de la cantidad de información que se debe guardar desde los modelos, la minimización de disipación de energía y la estabilidad de la condición de borde (CB), se consideran 10 puntos que se emplazan en forma perpendicular a la entrada de la bahía de San Antonio. A su vez estos se ubican de manera paralela a la zona de generación, a una distancia de 100 metros frente a esta, y distribuidos equiespaciadamente uno de otro. En los 10 puntos definidos se calcula la altura significativa espectral (procedimiento descrito en la sección 3.4), las cuales se promedian. Dicho resultado representa la energía promedio

que ingresa al modelo. Ésta se comparará con el valor de energía configurado como condición de borde en cada uno de los modelos.

Por otro lado, para comprender las diferencias de los procesos de propagación que están incorporados por ambos modelos, se calcularán las alturas significativas espectrales de cada uno de los puntos que componen las trayectorias. Con ellos se construirán perfiles de altura significativa espectral de cada una de las trayectorias, los cuales se analizarán en cuanto a los procesos de propagación que puedan explicar las variaciones de altura significativa a lo largo de cada una de las trayectorias.

3.6. Comparación de espectros en el punto P0

Los espectros de frecuencias a comparar son los que se obtendrán con las simulaciones realizadas con MIKE 21 BW y SWASH. Estos espectros son comparados en el punto P0 para las distintas condiciones de oleajes a modelar. El punto P0 además cuenta con resultados de espectros de frecuencias obtenidos a partir del modelo físico de HR Wallingford, contra los cuales se realizarán comparaciones.

La comparación de los espectros de frecuencia se realiza respecto a la forma que tienen estos, a la altura significativa espectral total y la altura significativa espectral asociada al contenido onda larga. Además se obtendrán los factores de habilidad predictiva (definido en la ecuación (2.1)) asociados a las alturas significativas espectrales obtenidas con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH, considerando la determinada por el modelo realizado por HR Wallingford como valor referencial.

3.7. Comparación espacial en la dársena de San Antonio de los espectros

El comportamiento espacial de la energía dentro de la dársena de los puertos es esencial para conocer los sectores críticos desde el punto de vista de la operatividad del puerto. Es por ello que se generarán mapas de altura significativa espectral total y del contenido de onda larga, dentro de la dársena del puerto de San Antonio. Estos se obtendrán para las distintas condiciones de oleaje modeladas.

Para la obtención de los mapas mencionados, se obtendrán los espectros de frecuencia asociados aproximadamente a 460 puntos localizados dentro de la dársena, estos son seleccionados estratégicamente para cubrir la totalidad del área que define a la dársena. Con estos se obtendrán las alturas significativas espectrales del contenido total y de ondas largas correspondientes a cada uno de los espectros de frecuencia obtenidos con anterioridad. Para la cubrir la totalidad de la dársena, las alturas significativas espectrales asociadas contenido total de frecuencias y al contenido de onda larga obtenidas, se interpolarán, obteniéndose así la distribución espacial de la altura significativa espectral dentro de la dársena.

3.8. Relación de altura significativa espectral de onda corta fuera del puerto y onda larga dentro del puerto

La obtención de la correlación existente entre la altura significativa espectral asociada al contenido total de frecuencias fuera del puerto y la asociada al contenido de onda larga dentro del puerto, tiene por objetivo conocer el comportamiento más probable que tendrá la superficie libre dentro del puerto dada cierta condición de oleaje presente fuera del puerto.

Se obtendrán las relaciones entre el punto P1 localizado fuera del puerto, con el punto P0 y los sitios con los que cuenta el puerto de San Antonio (Figura 3.2). Se graficará la altura significativa espectral del punto P1 v/s las alturas significativas espectrales del contenido de onda larga asociada al punto P0 y los sitios de interés. La altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga de los sitios se obtendrá como el promedio de las alturas significativas espectrales asociadas al contenido de onda larga de la región que define al correspondiente sitio en análisis, el promedio se obtiene desde los mapas de distribución de alturas significativas espectral asociada al contenido de onda larga. Las relaciones que se determinarán, se obtienen del ajuste de funciones sobre el set de datos de altura significativa espectral del contenido total fuera del puerto v/s la altura espectral del contenido de onda larga dentro del puerto (en el punto P0 y los sitios).

3.9. Modos resonantes del puerto de San Antonio

Los modos resonantes del puerto de San Antonio son importantes ya que indican los rangos de frecuencias en los que la dársena del puerto de San Antonio puede encontrarse en resonancia. Con ellos también se determina cuál es el rango de frecuencia que contiene mayor cantidad de energía.

Los modos resonantes del puerto de San Antonio son calculados a partir de la totalidad de los espectros que fueron obtenidos al interior de la dársena del puerto de San Antonio. Estos espectros se analizan en el rango de frecuencias correspondiente al contenido de onda larga. En dicho rango se determinan los picos y valles que existen, la coincidencia de la mayor cantidad de estos últimos definen las frecuencias límites de cada uno de los modos resonantes de puerto en cuestión. La Figura 3.4 se puede utilizar como ejemplo del procedimiento para obtener los modos resonantes. En dicha figura se expone el contenido de energía asociado a la onda larga de tres puntos ubicados dentro de la dársena del puerto de San Antonio (se calculan para un total de 462 puntos ubicados dentro de la dársena). Además, en ella se pueden apreciar los picos y valles. Estos últimos son los que definen a los modos resonantes. En la figura se identifican 5 modos resonantes.

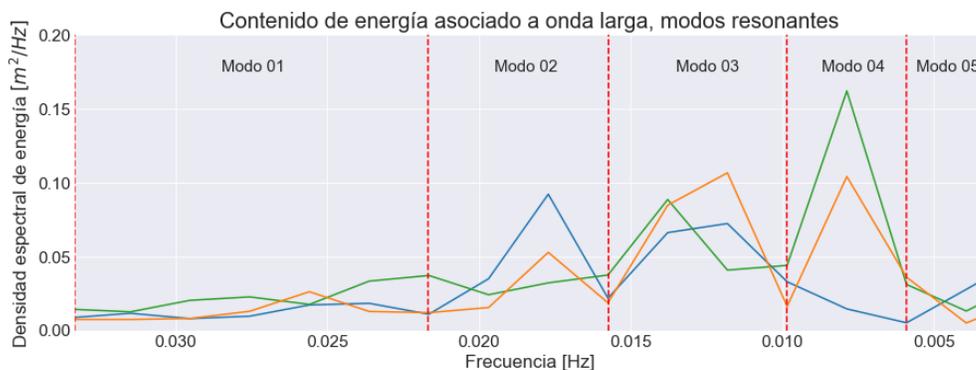


Figura 3.4: Determinación de los rangos de frecuencias que definen a los modos resonantes a partir del contenido de onda larga de tres espectros asociados a tres ubicaciones dentro de la dársena del puerto de San Antonio.

3.10. Tiempo computacional

Se comparará la demanda computacional en cuanto al tiempo de cómputo que tiene la ejecución de cada uno de los modelos, MIKE 21 BW y SWASH.

Capítulo 4

4. Condiciones de oleaje modeladas

4.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan las condiciones de oleaje que fueron modeladas en el contexto del presente trabajo.

4.2. Condiciones de oleaje

Las condiciones de oleaje son una variable fundamental en la simulación realizada por los modelos. Estas son variables de entradas en los modelos. Las condiciones de oleaje simuladas en el presente trabajo de título, son propiedad de EPSA.

A continuación, en la Tabla 4.1, se exponen parámetros como altura significativa (H_s), periodo peak (T_p), factor de mejoramiento de peak (γ) y dirección del oleaje, que definen las condiciones de oleaje que se modelaron. Estas condiciones fueron seleccionadas debido a que cuentan con resultados obtenidos por el modelado físico realizado por HR Wallingford. La información disponible corresponde a series de tiempo de superficie libre y espectros de oleaje en un punto ubicado en la entrada de la dársena del puerto de San Antonio (P0). Se utilizará esta información para validar los resultados obtenidos con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH.

Tabla 4.1: Condiciones de oleaje modeladas.

| Condición de oleaje | Altura significativa, H_s [m] | Periodo Peak, T_p [s] | JONSWAP γ | Dirección de oleaje [°] |
|---------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| WC01 | 2,9 | 12 | 2,0 | 274 |
| WC02 | 2,9 | 14 | 2,0 | 274 |
| WC03 | 3,9 | 14 | 2,0 | 274 |
| WC04 | 4,3 | 14 | 2,0 | 274 |
| WC05 | 2,9 | 16 | 2,0 | 274 |
| WC06 | 2,9 | 18 | 2,2 | 274 |

En la Figura 4.1 se presenta el espectro de oleaje del punto P0, asociado a la primera condición de oleaje (WC01H2.9T12D274). En la figura se observa una línea segmentada vertical roja que divide al espectro en dos secciones. La sección I corresponde al oleaje asociado a frecuencias bajas (ondas largas), en esta se encuentra cuantificada la energía asociada a ondas largas. Mientras que la sección II corresponde oleaje asociado frecuencias altas (ondas cortas). En esta se encuentra cuantificada la energía asociada a ondas cortas. El resto de los espectros de oleaje modelados en el presente trabajo se encuentran adjuntos en el Anexo A.

Capítulo 4: Condiciones de oleaje modeladas

Para la obtención de los espectros se aplica el procedimiento descrito en la sección 3.3.

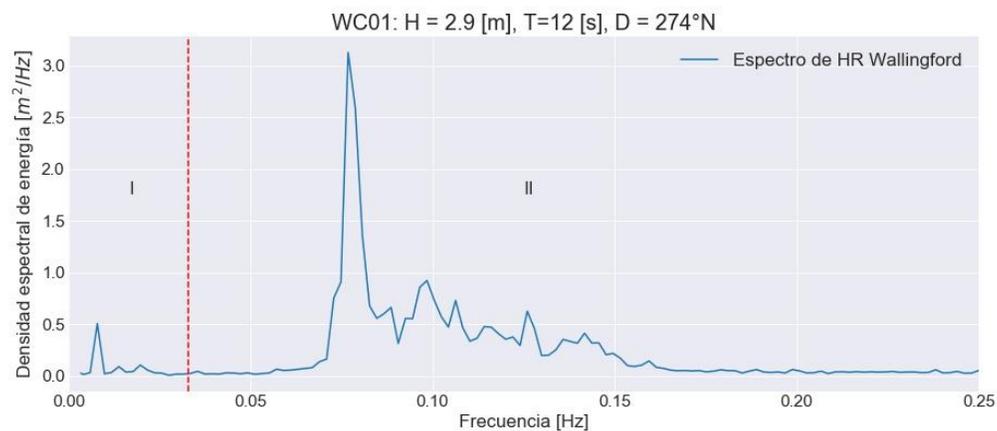


Figura 4.1: Espectro de oleaje de la condición de oleaje WC01H2.9T12D274 asociado al punto P0 del modelo.

Capítulo 5

5. Construcción de los modelos

5.1. Introducción

El presente capítulo describe los diferentes parámetros necesarios por los dos modelos numéricos incluidos en este estudio, para la simulación del fenómeno de interés.

5.2. Especificaciones de los modelos

En el proceso de construcción de los modelos, se definieron parámetros fundamentales para efectos del modelado. Algunos de ellos respecto a las dimensiones del modelo (área modelada), resolución espacial y temporal, profundidad máxima y mínima, entre otros. El detalle de estos se encuentra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Características fundamentales de los modelos.

| Parámetro | MIKE21 BW | SWASH |
|---|-----------|-------|
| Profundidad máxima [m] | 40 | 40 |
| Profundidad mínima [m] | 10 | 10 |
| Dimensión a lo largo de x [m] | 6650 | 4650 |
| Dimensión a lo largo de y [m] | 9010 | 9010 |
| Máxima distancia de propagación de oleaje [m] | 3710 | 3710 |
| Resolución espacial [m] | 10 | 10 |
| Resolución temporal [s] | 0.2 | 0.2 |
| Tiempo simulado [hrs] | 3.0 | 3.0 |

5.3. Batimetría

La batimetría es una variable fundamental en la construcción de los modelos, esta es el punto de partida de los distintos fenómenos físicos que existen en la propagación de oleaje, tales como difracción, reflexión, refracción, shoaling, etc.

La batimetría del sector se construyó en base de información de cartas náuticas e información batimétrica disponible al interior del puerto de San Antonio, esta última fue información proporcionada por PRDW.

Debido a la restricción del modelo MIKE 21 BW, respecto a la relación que existe entre periodo mínimo (T_{min}) y profundidad máxima, se limitó la profundidad máxima a 40 m. De esta forma la construcción de la batimetría se configuró de tal forma de ajustar la información disponible con la limitación mencionada. Cabe destacar que la zona que se encuentra al sur del rompeolas exterior que conforma al puerto de San Antonio, no refleja la batimetría real de dicha zona. La batimetría de dicha zona se

Capítulo 5: Construcción de los modelos

construye con el fin de generar una relación adecuada de la zona con la restricción de profundidad máxima mencionada. Debido a la dirección de oleaje considerado y la posición de entrada del puerto dicha zona no afectará los resultados obtenidos dentro de la dársena del puerto.

La batimetría utilizada por ambos modelos está esquematizada en la Figura 5.1 y la Figura 5.2. La primera muestra un plano general de la batimetría, mientras que la segunda muestra un acercamiento a la zona de interés para efectos del trabajo de título.

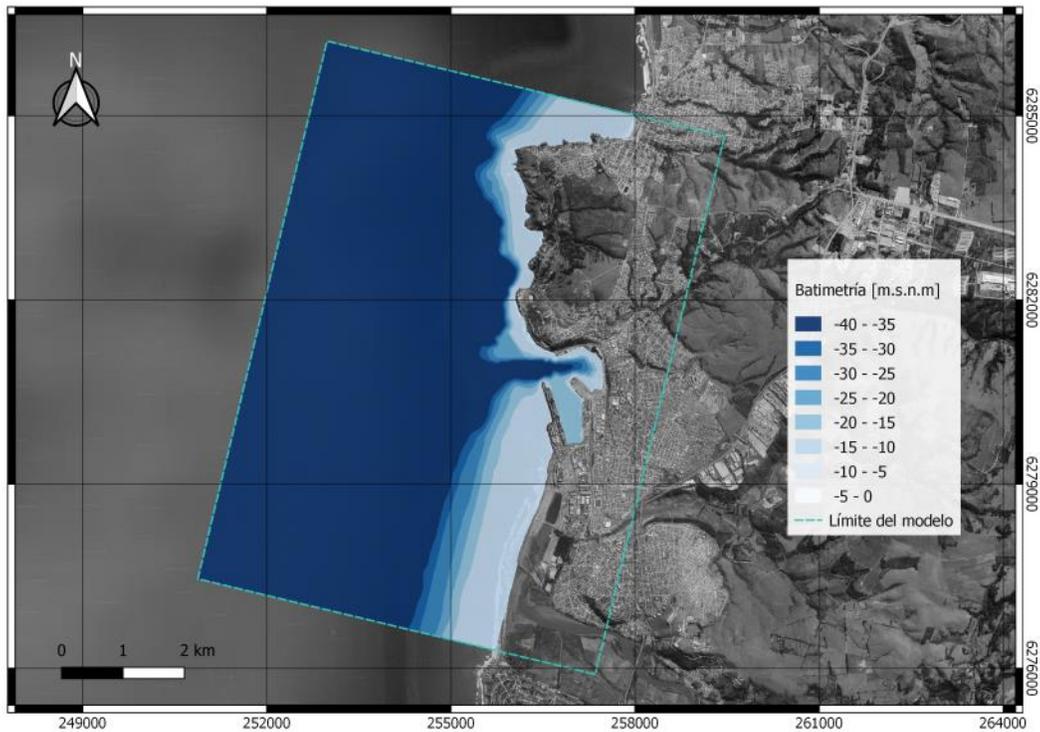


Figura 5.1: Batimetría de la totalidad de la extensión del modelo.

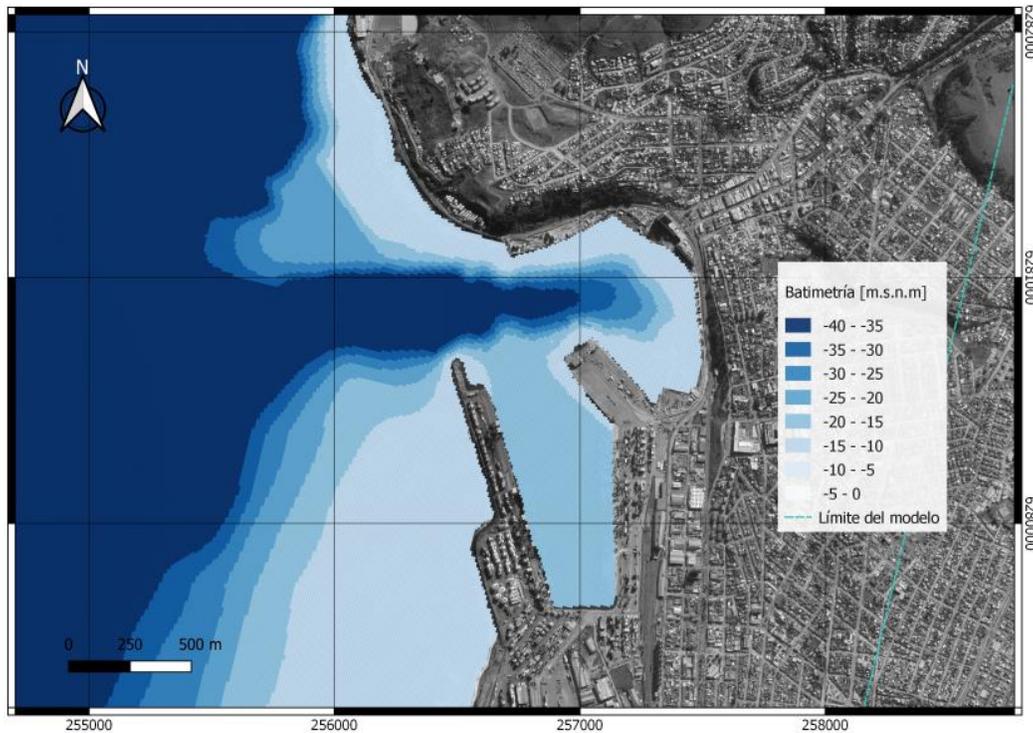


Figura 5.2: Batimetría de la zona del puerto de San Antonio.

5.4. Porosidad

La capa de porosidad es usada para modelar el proceso de reflexión y disipación en estructuras porosas como rompeolas, escolleras y playas, dicha capa se construye de forma diferente para cada uno de los modelos. La capa de porosidad que utiliza el modelo MIKE 21 BW se construye considerando la función expuesta en el estudio de Madsen (1983), la cual considera parámetros como diámetro de grano, altura y periodo de la onda incidente, profundidad del agua, entre otros. Por otro lado la capa de porosidad utilizada por el modelo SWASH se construye en base a la porosidad volumétrica de la estructura porosa.

Los coeficientes de porosidad utilizados por el modelo SWASH son obtenidos desde el manual del modelo (The SWASH team, 2019). Así la información utilizada en el modelado es la que se presenta en la Figura 5.3. Los coeficientes de porosidad de la línea de costa que no se visualizan en la Figura 5.3 tienen un valor de 0.4 en el caso de la línea de costa ubicada al norte del modelo y 0.2 en la línea de costa ubicada al sur del modelo.

Con la información de los coeficientes de reflexión en la costa facilitada por la empresa PRDW, se construye la capa de porosidad que requiere el modelo MIKE 21 BW, para la simulación de reflexión de la onda en la costa. La información respecto a la capa de porosidad también es facilitada por la empresa PRDW, y se encuentra esquematizada en la Figura 5.4.

Capítulo 5: Construcción de los modelos

Los coeficientes de porosidad de la línea de costa que no se visualizan en la Figura 5.4 tienen un valor de, 0.82 en el caso de la línea de costa ubicada al norte del modelo y 0.83 en la línea de costa ubicada al sur del modelo.

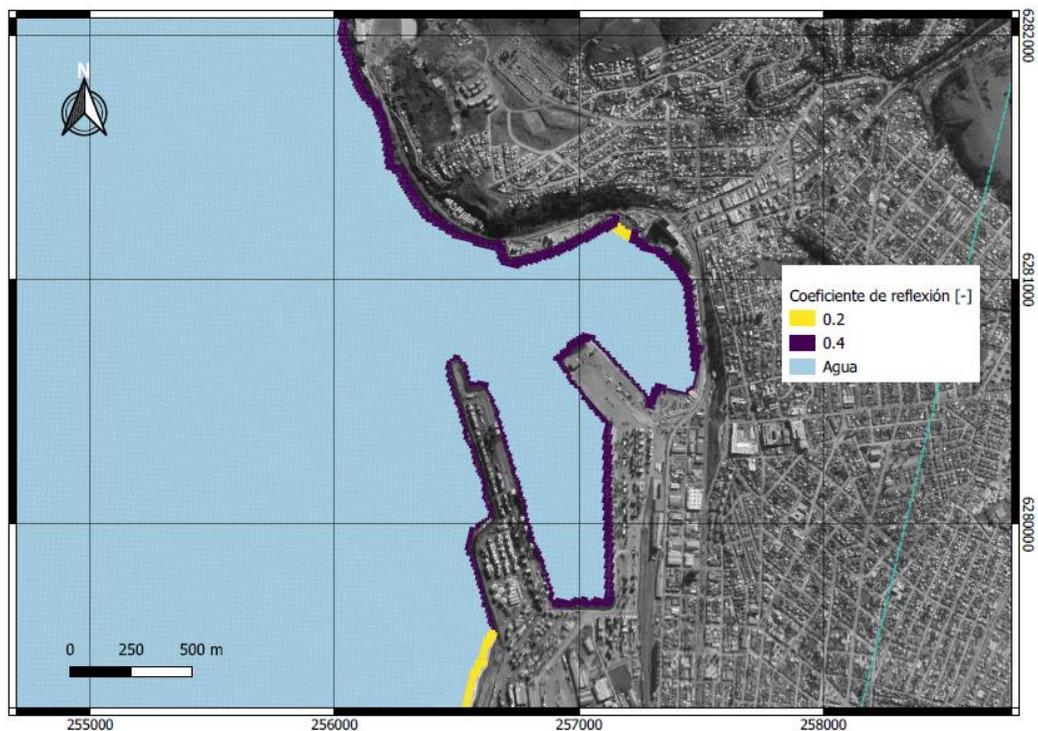


Figura 5.3: Distribución espacial del coeficiente de reflexión de la zona del puerto de San Antonio, utilizado en el modelo SWASH.

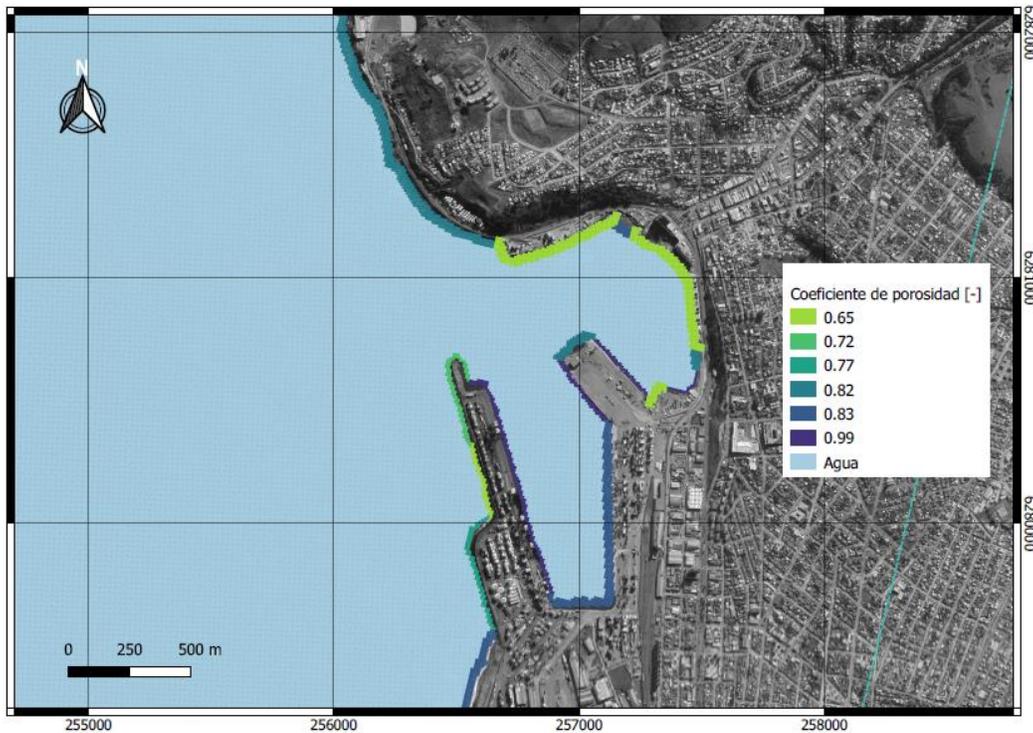


Figura 5.4: Distribución espacial del coeficiente de porosidad de la zona del puerto de San Antonio, utilizado en el modelo MIKE 21 BW.

5.5. Absorción de energía

La capa esponja o capa absorbente se utiliza como una manera eficiente de absorción de energía, esto con la finalidad de simular procesos de disipación y a la vez evitar que el sistema acumule energía. Esta se configura lo largo de los límites del modelo, para así simular en dicho sector la absorción de energía de las ondas que en la realidad están siendo propagadas fuera del área del modelo. Como la función de la capa esponja es absorber la energía de las ondas que se propagan fuera del modelo, las dimensiones de la capa esponja tiene directa relación con la máxima longitud de onda presente en el modelo, debe ser capaz de absorber toda la energía de dicha onda. De esta forma el ancho de la capa absorbente debe ser de una a dos veces la longitud de onda correspondiente a la onda más energética. Teniendo en consideración lo anterior es que se configuran la capa absorbente de MIKE 21 BW y SWASH. En la Figura 5.5 se presenta la capa esponja configurada para el modelo MIKE 21 BW.

En la Figura 5.6 se presenta la capa esponja que se configura en el modelo numérico SWASH. La diferencia respecto a la capa esponja configurada en el modelo numérico MIKE 21 BW radica en la ausencia de capa esponja en el sector Oeste del modelo (zona de generación). Se configura de esta manera ya que la zona de generación del modelo SWASH debe posicionarse en uno de los límites del modelo. Con lo anterior se explica también la diferencia que existe en las dimensiones del eje x que tienen los modelos, dicha diferencia se observa en la Tabla 5.1.

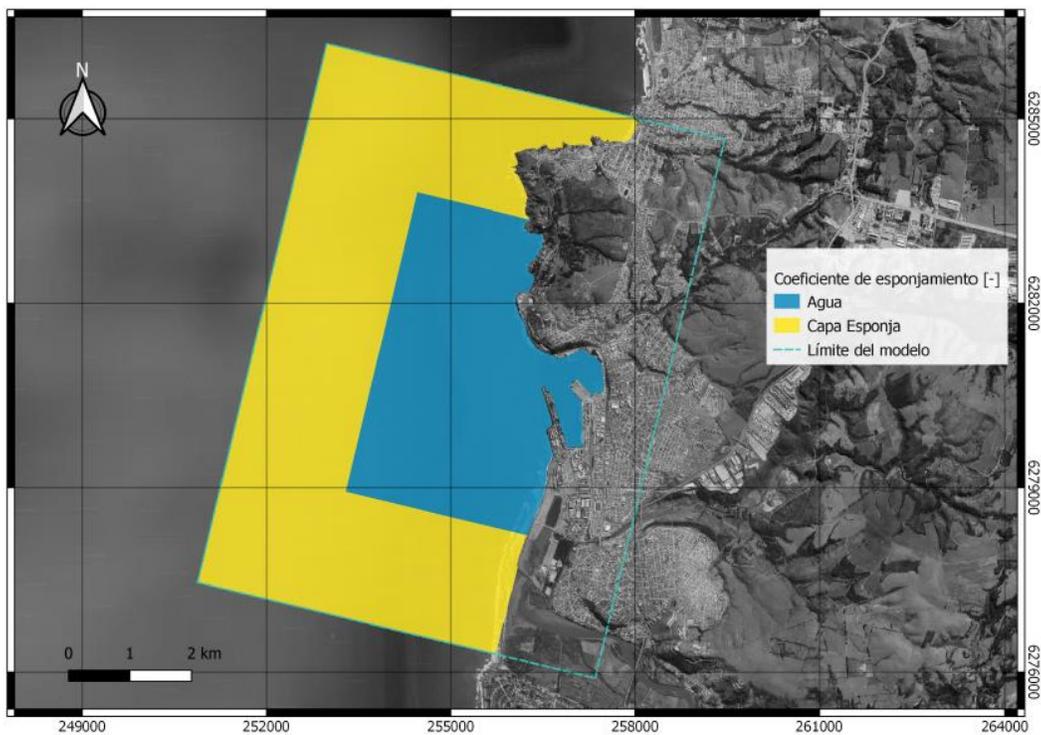


Figura 5.5: Distribución espacial la capa esponja de la totalidad de la extensión del modelo MIKE 21 BW.

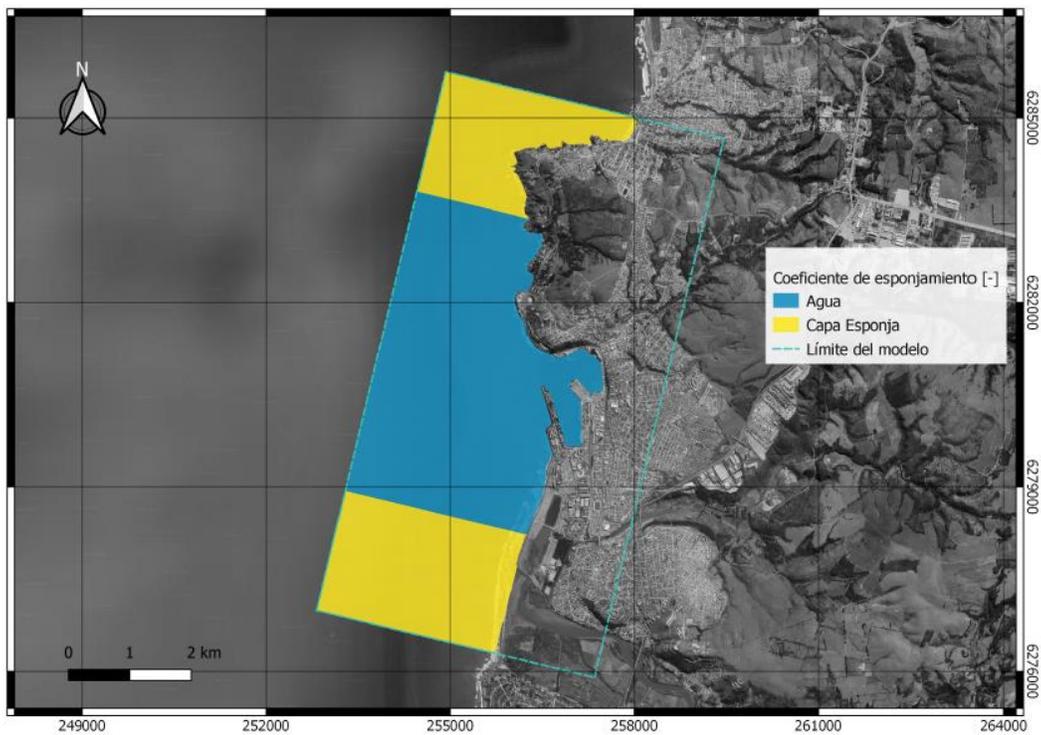


Figura 5.6: Distribución espacial la capa esponja de la totalidad de la extensión del modelo SWASH.

5.6. Fricción

En la propagación del oleaje la resistencia del fondo marino actúa como un elemento de disipación de la energía con la cual se propagan las ondas. Es por ello que en el modelado de propagación de oleaje, esta variable es considerada a través de un término en específico, el cual se basa en la formulación de Manning para el cálculo de la pérdida de energía por fricción.

A continuación en las Figura 5.7 y Figura 5.8, se presenta la distribución del coeficiente de fricción utilizado en el modelado realizado con MIKE 21 BW y SWASH.

Las capas son construidas considerando la metodología utilizada por PRDW, la cual considera las recomendaciones expuestas en el manual de MIKE 21 BW. Cabe mencionar que el número de Manning que se configura en el sector en que se ubica la capa de absorción de energía es alto en comparación al del sector donde se propaga el oleaje, esto genera una gran variación del número de Manning en un espacio reducido. Se configura de esta manera con la finalidad de asegurar la disipación de la energía de las ondas que están siendo reflejadas desde la costa y que deben salir del modelo

En la Figura 5.7 se presenta la distribución espacial del número de Manning que se configuró en el modelo. En la Figura 5.8 se presenta el detalle del número de Manning configurado en el sector del puerto.

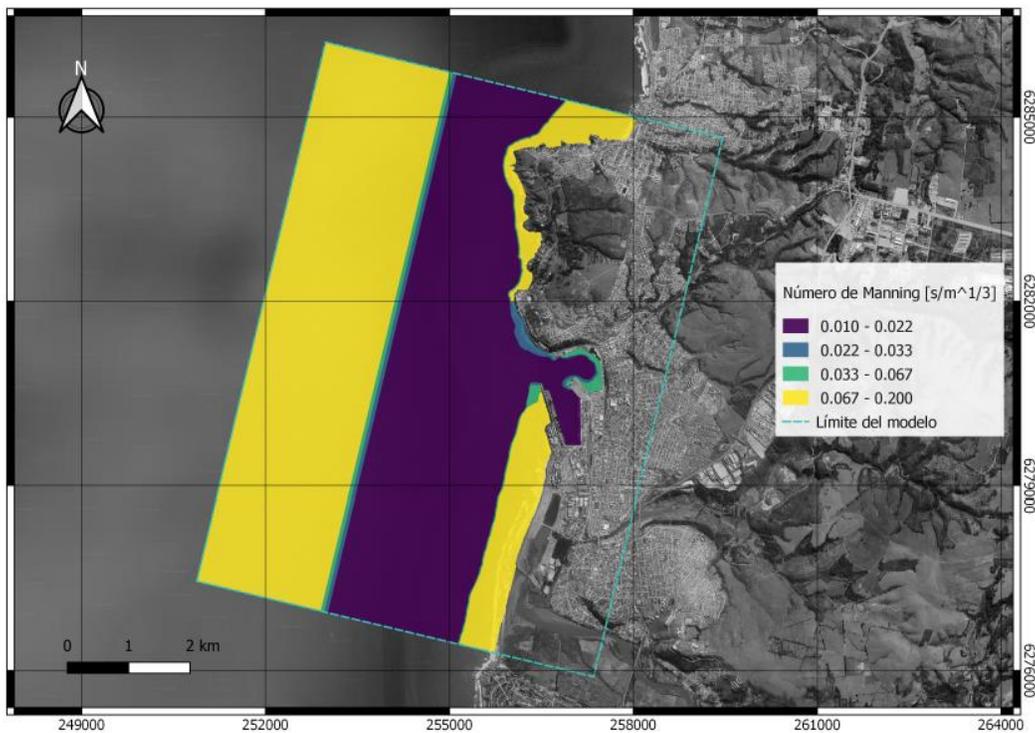


Figura 5.7: Distribución espacial del coeficiente de fricción en el dominio del modelo.

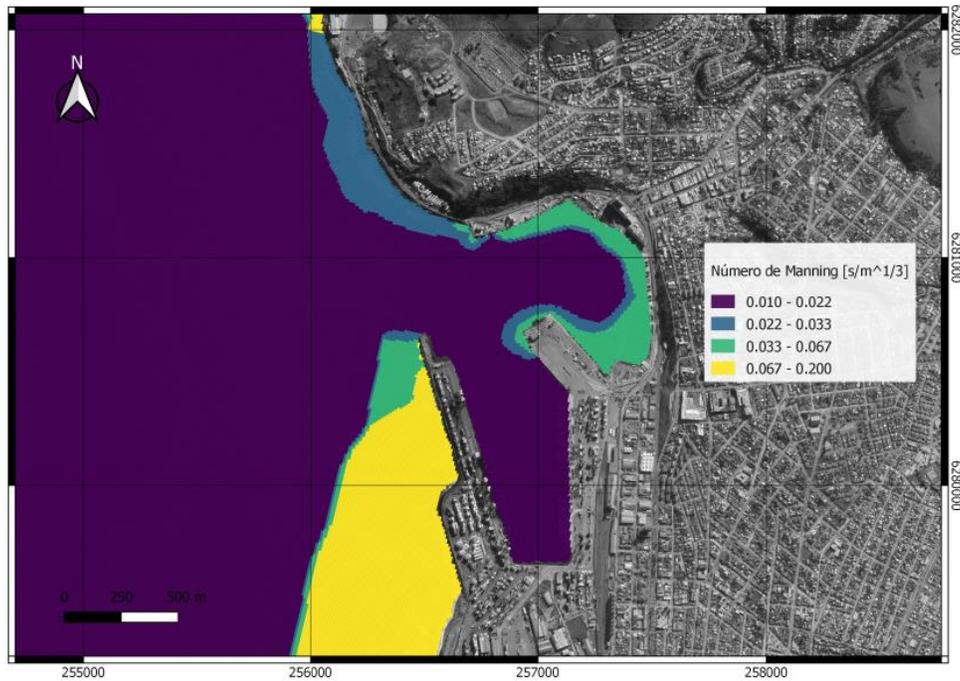


Figura 5.8: Coeficiente de fricción de la zona del puerto de San Antonio.

5.7. Número de capas verticales utilizadas en SWASH

Para la resolución de la dispersión de frecuencia con un nivel aceptable de precisión, el modelo numérico SWASH utiliza un método numérico para la aproximación del gradiente vertical de presión no hidrostática, en conjunto con una malla vertical que indica la cantidad de capas verticales igualmente distribuidas. El modelo mejora su dispersión de frecuencia simplemente aumentando el número de capas verticales, pero esto tiene un costo computacional mayor. Se debe determinar un número de capas que logre mejorar la dispersión de frecuencias y que a su vez tenga un costo computacional razonable.

La cantidad de capas verticales que se utilizan en el modelo numérico SWASH, es determinada sobre la base de los resultados obtenidos desde un modelo de prueba de dimensiones más pequeñas en comparación al modelo desarrollado para el presente trabajo de título. Las características del modelo de prueba se presentan en la Tabla 5.2.

Capítulo 5: Construcción de los modelos

Tabla 5.2: Características del modelo SWASH utilizado para la calibración de las capas verticales.

| Parámetro modelo de prueba | SWASH |
|---|-------|
| Profundidad máxima [m] | 30 |
| Profundidad mínima [m] | 5 |
| Dimensión a lo largo de x [m] | 1920 |
| Dimensión a lo largo de y [m] | 1040 |
| Máxima distancia de propagación de oleaje [m] | 1552 |
| Resolución espacial [m] | 8 |
| Resolución temporal [s] | 0.2 |
| Tiempo simulado [hrs] | 3.0 |

Ya que el objetivo principal del presente trabajo es comparar los resultados respecto a ondas largas obtenidos desde el modelado con MIKE 21 BW y SWASH, es que se decidió considerar la altura espectral del contenido de onda larga como indicador para analizar y determinar el número de capas verticales a configurar en modelo SWASH. El fenómeno de onda larga está relacionado con las interacciones que existen entre las ondas cortas de un grupo de oleaje y la transferencia de energía de estas a frecuencias más bajas, es por ello que el presente análisis tiene como objetivo evaluar el contenido de energía asociado a onda larga y sensibilizar este respecto del número de capas verticales. En consecuencia cuando la variación del contenido de energía asociado a frecuencias bajas es baja, se considera que el modelo reproduce correctamente el fenómeno de interés.

El modelo de prueba fue construido y simulado tanto en MIKE 21 BW y SWASH. La condición de oleaje simulada en el modelo de prueba tiene una altura de $H_s = 2.0$ [m], periodo peak $T_p = 12$ [s] y dirección perpendicular a la zona de generación. Adicionalmente cabe mencionar que se intentó simular en SWASH la misma serie de tiempo utilizada por el modelo MIKE 21 BW en la generación de oleaje. Esto se realizó configurando la condición de borde (zona de generación de oleaje) en SWASH como la perturbación de la superficie libre frente a la zona de generación inducida por la condición de borde configurada en el modelo MIKE 21 BW. Los resultados obtenidos con este procedimiento fueron inconsistentes, desechando dicha opción. Debido a lo anterior se decidió configurar las condiciones de borde de ambos modelos, con espectros de frecuencia de oleaje.

En la Figura 5.9 se presentan los resultados obtenidos de la altura significativa espectral del contenido de onda larga en función de la cantidad de capas verticales configuradas en el modelo de prueba. En dicha figura se aprecia que la diferencia entre los resultados obtenidos con distintas configuraciones del número de capas verticales, disminuye en conjunto con el aumento del número de capas. A partir del modelado realizado con 4 capas verticales en adelante los resultados no presentan una variación considerable. Teniendo en consideración lo anterior y los costos computacionales que involucra el aumento en el número de capas verticales, se

Capítulo 5: Construcción de los modelos

determina la configuración del modelo del presente trabajo con cuatro capas verticales.

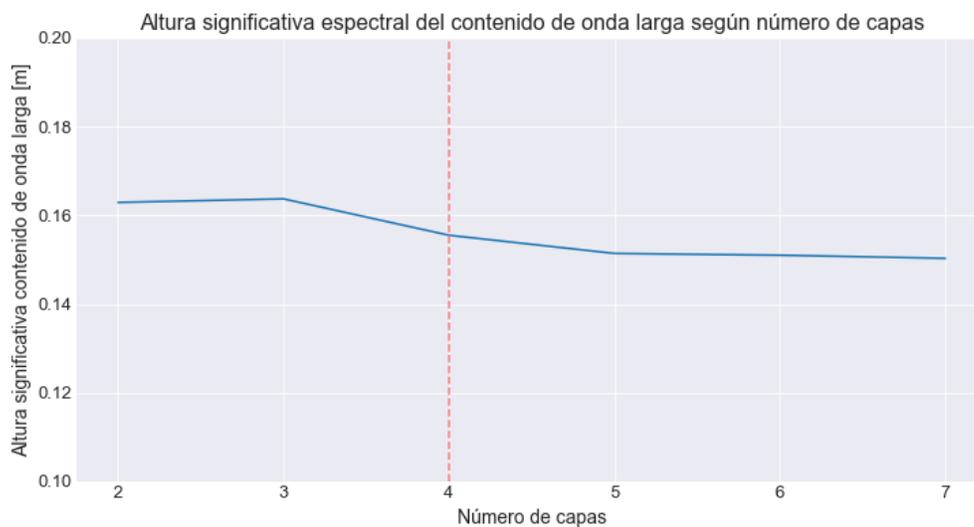


Figura 5.9: Resultados de la altura significativa espectral del contenido de onda larga promedio según el número de capas configuradas en un modelo de prueba SWASH, los resultados pertenecen a una zona cercana a la zona de generación de oleaje.

Capítulo 6

6. Resultados del modelado numérico con MIKE 21 BW y SWASH

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante la realización del modelado numérico realizado con MIKE 21 BW y SWASH. Se presentan resultados de espectros de frecuencia, alturas significativas espectrales, distribución espacial dentro de la dársena de las alturas significativas, tiempos computacionales, entre otros.

6.1. Trayectorias

A continuación en la Figura 6.1 se presentan los resultados de las alturas significativas espectrales a lo largo de las trayectorias definidas de interés con la simulación de la condición de oleaje 5 (WC05H2.9T12D274). También se expondrán mediante la tabla la altura significativa espectral en la zona de generación de oleaje que se obtiene con el modelado realizado con MIKE 21 BW y SWASH.

Tabla 6.1: Comparación entre las altura significativa espectral configurada como condición de borde y la que se obtiene 100 metros delante de la zona de generación con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH.

| Condición de oleaje | Altura significativa configurada como condición de borde [m] | Altura significativa espectral 100[m] delante de la zona de generación, MIKE 21 BW [m] | Altura significativa espectral 100[m] delante de la zona de generación, SWASH [m] |
|---------------------|--|--|---|
| 01 | 2.90 | 3.08 | 2.72 |
| 02 | 2.90 | 3.05 | 2.85 |
| 03 | 3.90 | 4.11 | 3.79 |
| 04 | 4.30 | 4.54 | 4.19 |
| 05 | 2.90 | 2.99 | 2.87 |
| 06 | 2.90 | 2.97 | 2.95 |

Tabla 6.2: Factor de habilidad (ecuación (2.1)) predictiva entre las alturas espectral significativas obtenidas 100 metros delante de la zona de generación de oleaje con la altura espectral significativa configurada en la zona de generación de oleaje.

| Condición de oleaje | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} MIKE 21 BW 100 metros delante de la zona de generación respecto a H_{m0} configurado como condición de borde [-] | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} SWASH 100 metros delante de la zona de generación respecto a H_{m0} configurado como condición de borde [-] |
|---------------------|--|---|
| 01 | 0.94 | 0.94 |
| 02 | 0.95 | 0.98 |
| 03 | 0.95 | 0.97 |
| 04 | 0.94 | 0.97 |
| 05 | 0.97 | 0.99 |
| 06 | 0.98 | 0.98 |

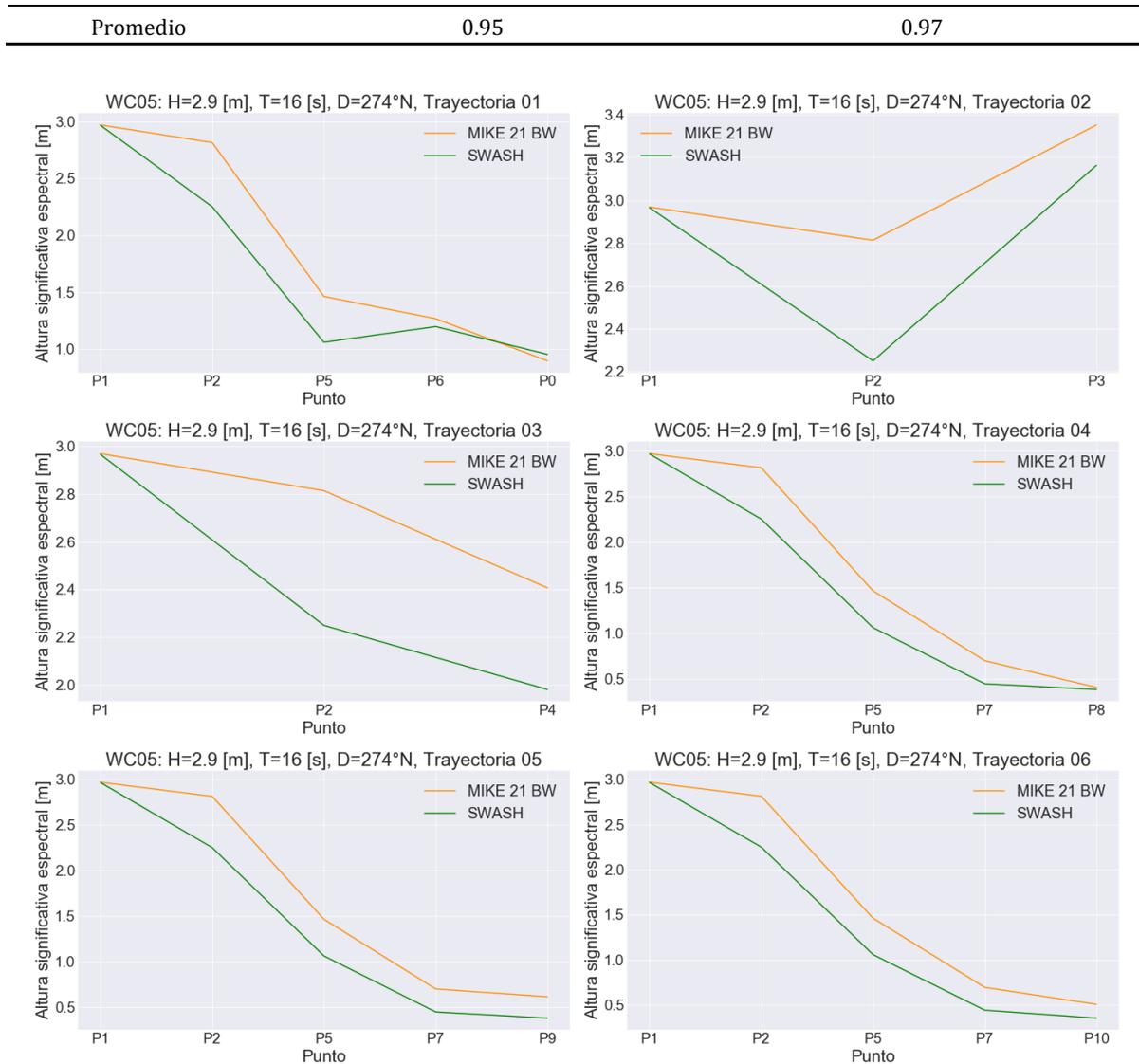


Figura 6.1: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 05 (WC05H2.9T16D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3.

Los resultados expuestos en la presente sección serán analizados en la sección 7.2 del presente trabajo.

6.2. Espectro completo

A continuación en la siguiente sección se adjuntan los espectros de oleaje obtenidos en el punto P0 para las diferentes condiciones de oleaje modeladas con MIKE 21 BW y SWASH. También se adjuntan los espectros obtenidos desde el modelado físico del puerto de San Antonio realizado por HR Wallingford.

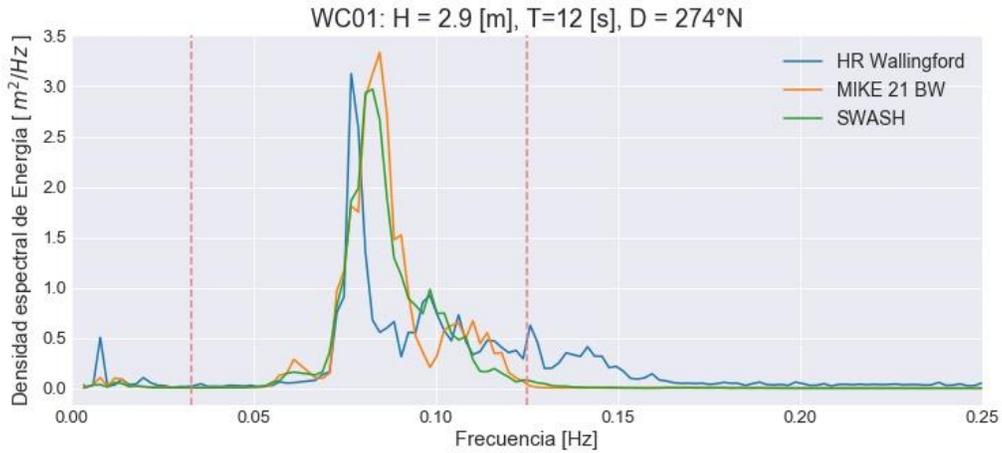


Figura 6.2: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 01 (WC01H2.9T12D274).

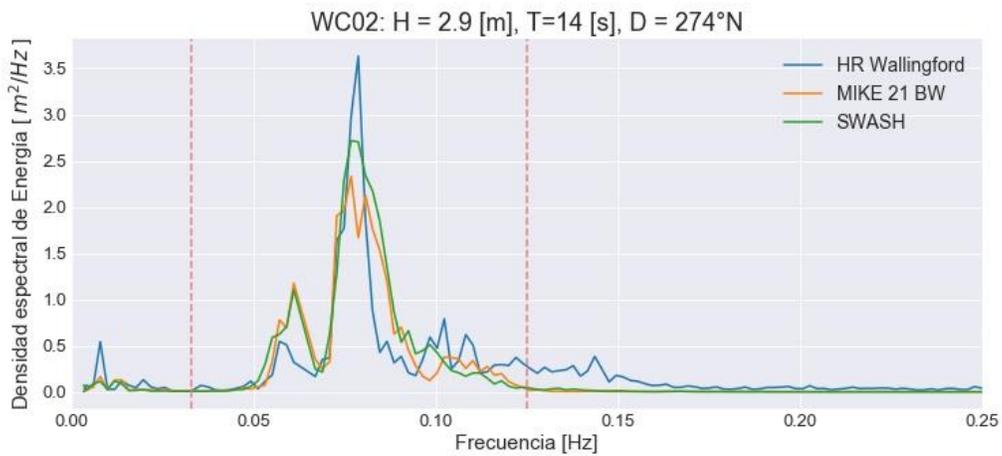


Figura 6.3: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 02 (WC02H2.9T14D274).

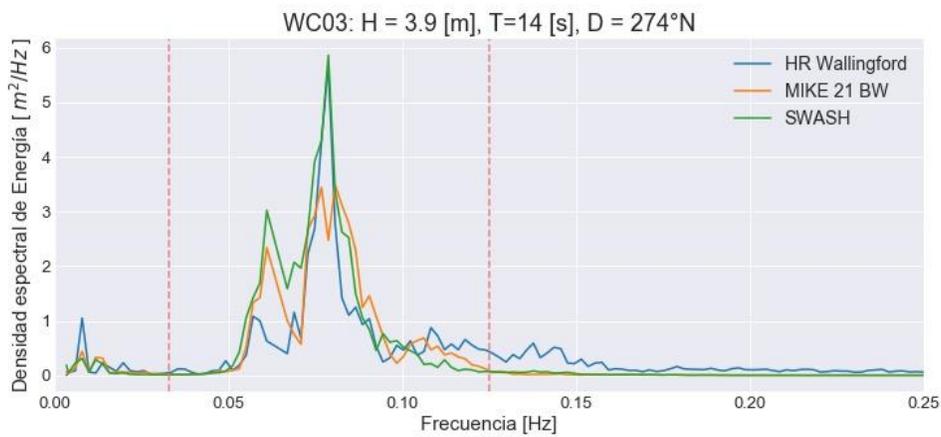


Figura 6.4: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 03 (WC03H3.9T14D274).

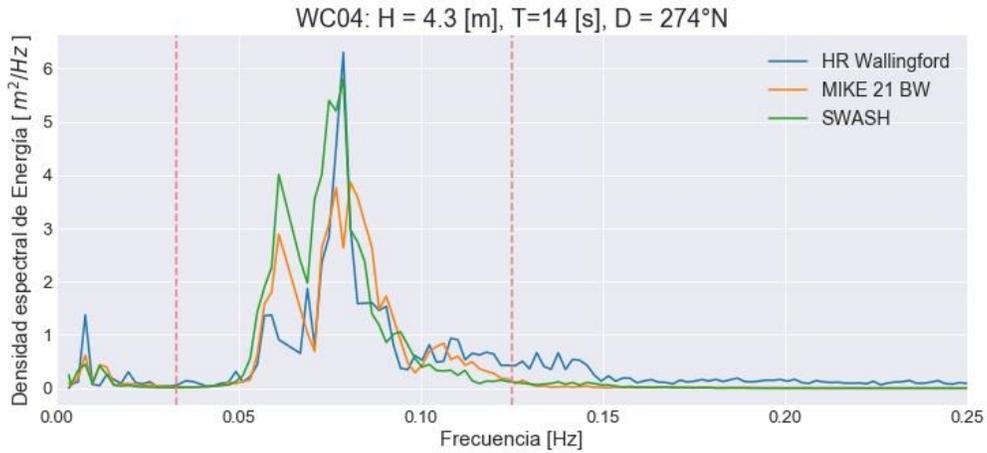


Figura 6.5: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 04 (WC04H4.3T14D274).

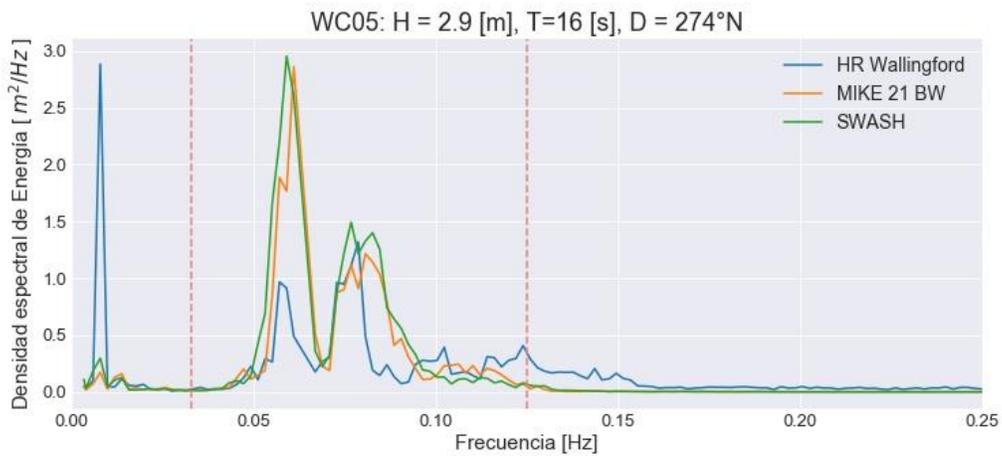


Figura 6.6: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 05 (WC05H2.9T16D274).

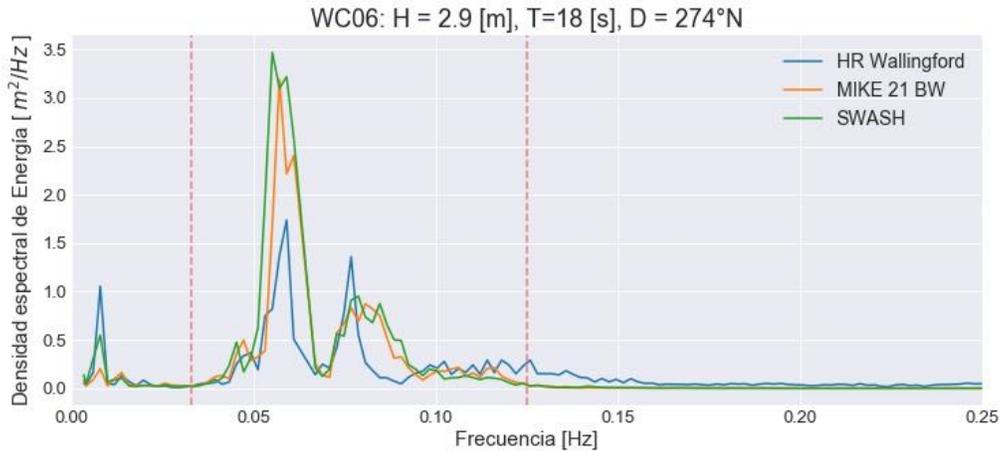


Figura 6.7: Espectro del modelo físico de Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 y SWASH, obtenido para la condición de oleaje 06 (WC06H2.9T18D274).

Los resultados expuestos en la presente sección serán analizados en la sección 7.3 del presente trabajo.

6.3. Altura significativa espectral del contenido total del espectro

Tabla 6.3: Alturas significativas espectrales correspondientes al espectro completo obtenido en el punto P0, para las distintas condiciones modeladas con modelos de, HR Wallingford MIKE 21 BW y SWASH.

| Condición de oleaje | H_{m0} HR Wallingford [m] | H_{m0} MIKE 21 BW [m] | H_{m0} SWASH [m] |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|
| 01 | 0.93 | 0.98 | 0.94 |
| 02 | 0.98 | 0.92 | 0.95 |
| 03 | 1.28 | 1.23 | 1.30 |
| 04 | 1.40 | 1.34 | 1.44 |
| 05 | 0.84 | 0.90 | 0.95 |
| 06 | 0.80 | 0.87 | 0.96 |

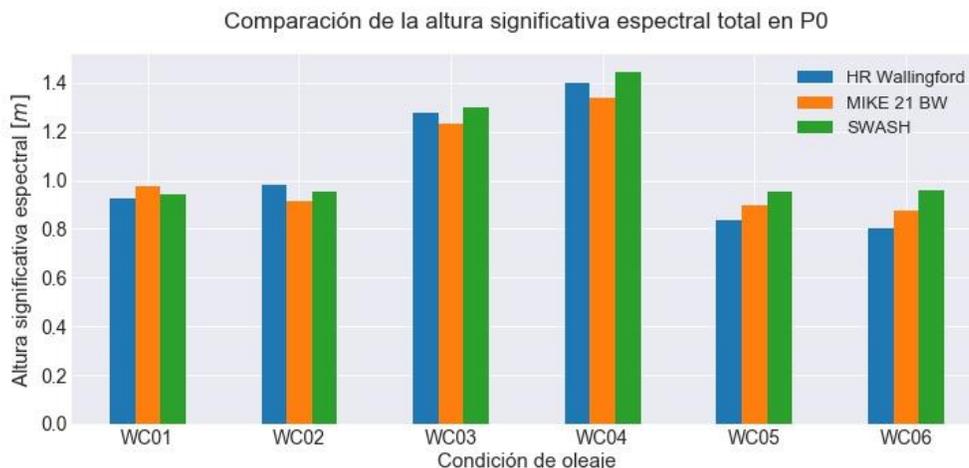


Figura 6.8: Gráfico comparativo de la altura significativa espectral del contenido total del espectro correspondiente a cada una de las condiciones de oleaje modelada en los modelos físicos de HR Wallingford y, modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH.

Tabla 6.4: Factor de habilidad predictiva (ecuación (2.1)) para las alturas significativas espectrales del contenido total del espectro, obtenido desde la comparación los tres modelos, HR Wallingford, MIKE 21 BW y SWASH.

| Condición de oleaje | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} MIKE 21 BW respecto a H_{m0} Wallingford [-] | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} SWASH respecto a H_{m0} Wallingford [-] | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} SWASH respecto a H_{m0} MIKE 21 BW [-] |
|---------------------|--|---|--|
| | 01 | 0.95 | 0.98 |
| 02 | 0.93 | 0.97 | 0.96 |
| 03 | 0.96 | 0.98 | 0.94 |
| 04 | 0.96 | 0.97 | 0.92 |
| 05 | 0.93 | 0.86 | 0.94 |
| 06 | 0.91 | 0.80 | 0.91 |
| Promedio | 0.94 | 0.93 | 0.94 |
| Desviación estándar | 0.02 | 0.08 | 0.02 |

Los resultados expuestos en la presente sección serán analizados en la sección 7.4 del presente trabajo.

6.4. Altura significativa espectral del contenido de onda larga del espectro

Tabla 6.5: Alturas significativas espectrales correspondientes al contenido de onda larga obtenido en el punto P0, para las distintas condiciones modeladas con modelos de, HR Wallingford MIKE 21 BW y SWASH.

| Condición de oleaje | H_{m0} HR Wallingford [m] | H_{m0} MIKE 21 BW [m] | H_{m0} SWASH [m] |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|
| 01 | 0.13 | 0.12 | 0.09 |
| 02 | 0.21 | 0.15 | 0.13 |
| 03 | 0.29 | 0.24 | 0.21 |
| 04 | 0.32 | 0.28 | 0.25 |
| 05 | 0.37 | 0.16 | 0.17 |
| 06 | 0.25 | 0.17 | 0.21 |

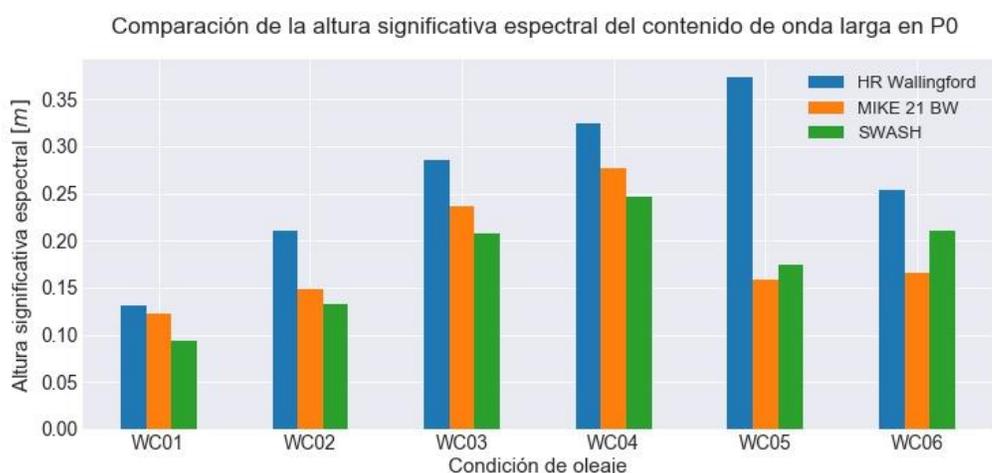


Figura 6.9: Gráfico comparativo de la altura significativa espectral del contenido de onda larga del espectro correspondiente a cada una de las condiciones de oleaje modelada en los modelos físicos de HR Wallingford y, modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH.

Tabla 6.6 Factor de habilidad predictiva (ecuación (2.1)) para las alturas significativas espectrales del contenido de onda larga del espectro, obtenido desde la comparación los tres modelos tres modelos, HR Wallingford, MIKE 21 BW y SWASH.

| Condición de oleaje | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} MIKE 21 BW respecto a H_{m0} Wallingford [-] | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} SWASH respecto a H_{m0} Wallingford [-] | Factor de habilidad predictiva entre H_{m0} SWASH respecto a H_{m0} MIKE 21 BW [-] |
|---------------------|--|---|--|
| 01 | 0.93 | 0.72 | 0.77 |
| 02 | 0.71 | 0.63 | 0.89 |
| 03 | 0.83 | 0.72 | 0.87 |
| 04 | 0.85 | 0.76 | 0.89 |
| 05 | 0.42 | 0.47 | 0.90 |
| 06 | 0.65 | 0.83 | 0.73 |
| Promedio | 0.73 | 0.69 | 0.84 |
| Desviación estándar | 0.18 | 0.13 | 0.07 |

Los resultados expuestos en la presente sección serán analizados en la sección 7.5 del presente trabajo.

6.5. Dársena

6.5.1. Altura significativa espectral, contenido total del espectro

Desde la Figura 6.10 a la Figura 6.15 se exponen los resultados de distribución de altura significativa espectral correspondiente a la totalidad del espectro. La distribución que se muestra corresponde a la zona de la dársena del puerto de San Antonio, y cada una de las figuras corresponde a una de las condiciones de oleaje modeladas.

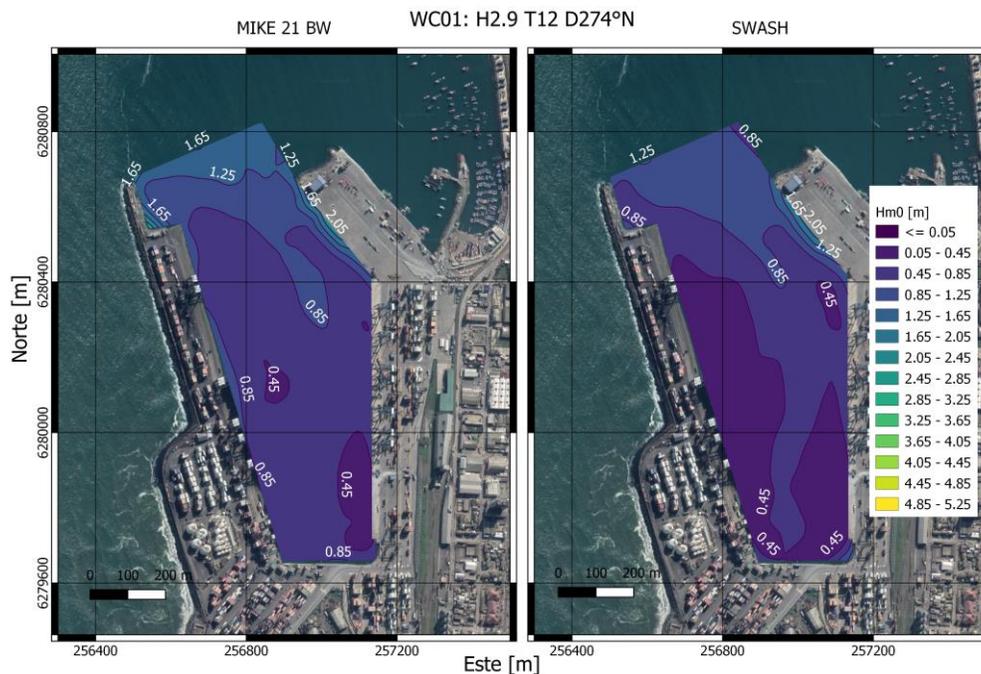


Figura 6.10: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

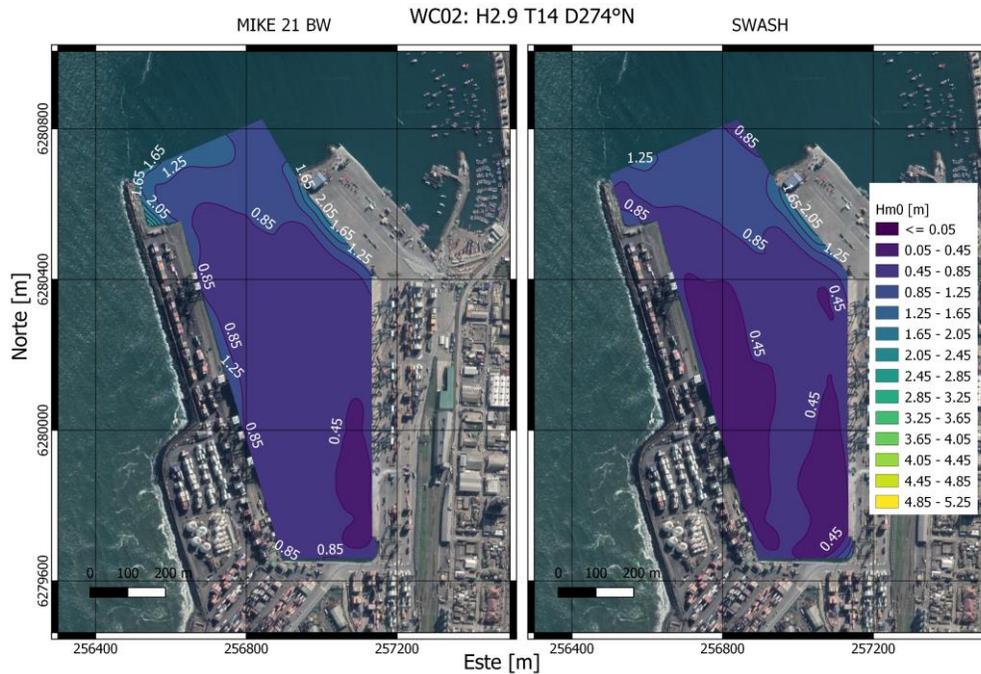


Figura 6.11: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a los obtenidos con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

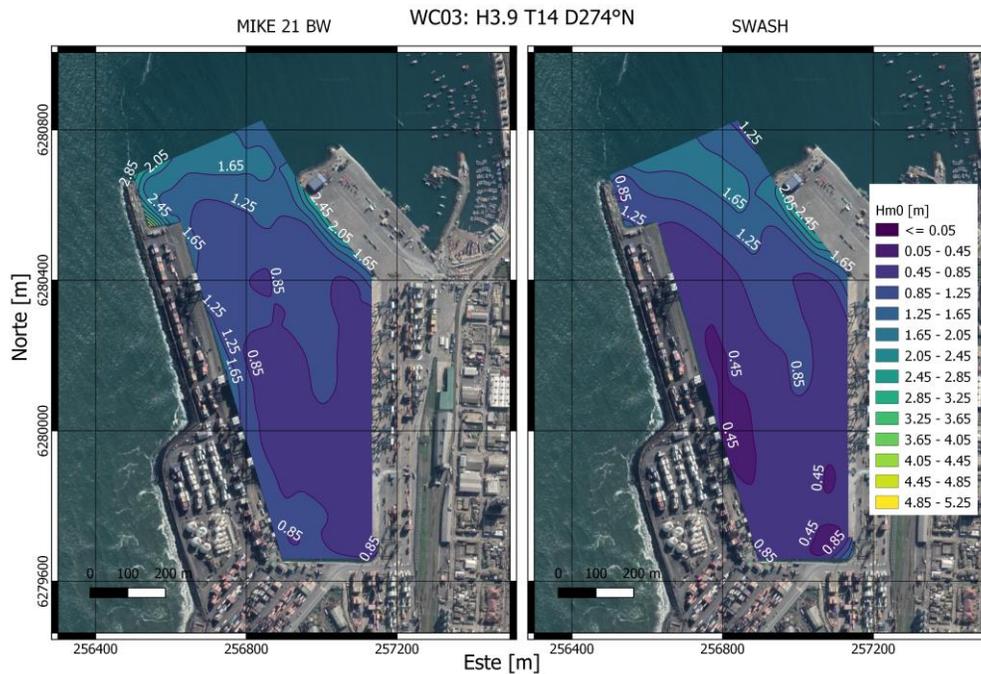


Figura 6.12: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a los obtenidos con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

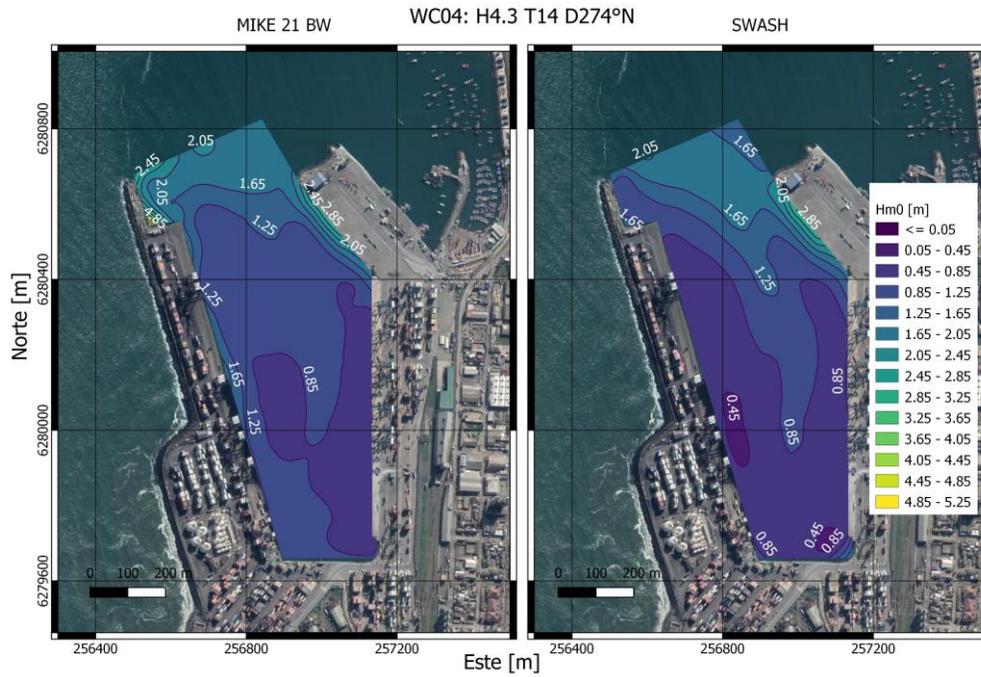


Figura 6.13: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

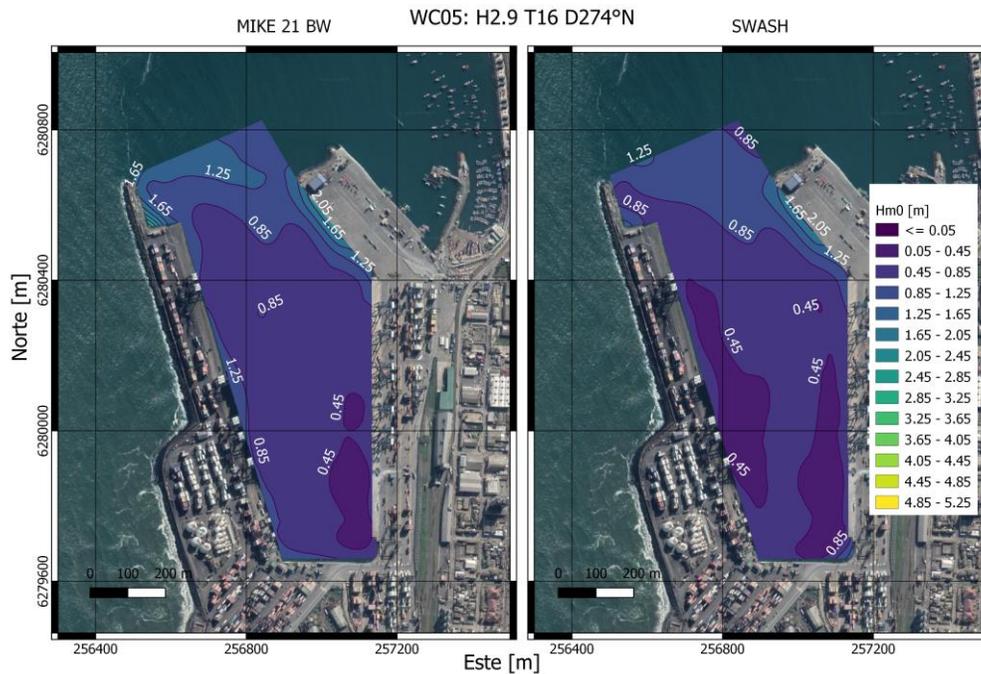


Figura 6.14: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

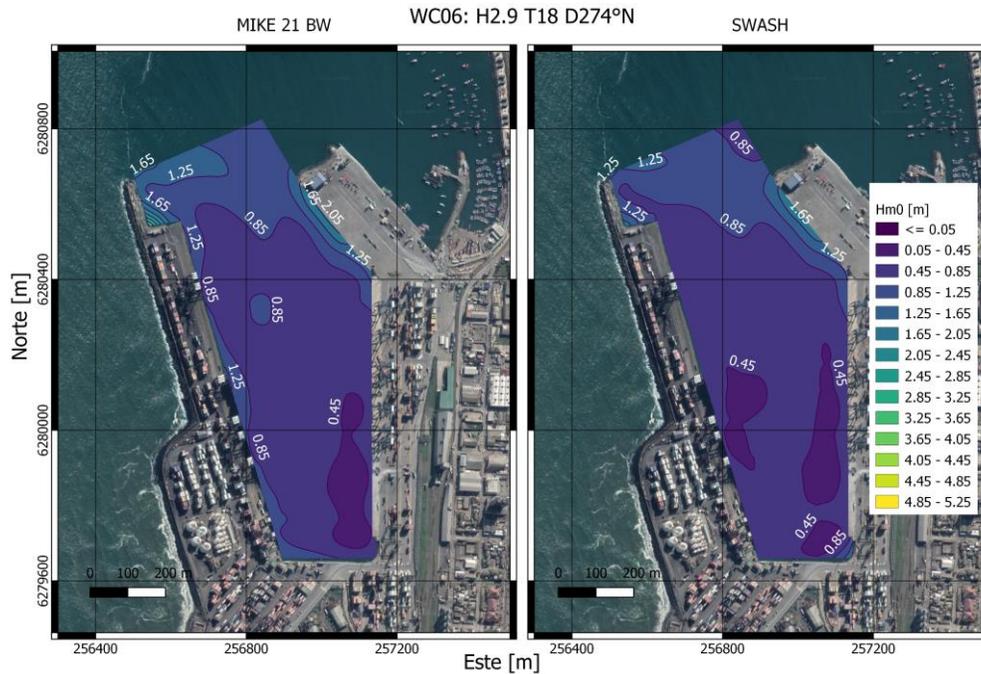


Figura 6.15: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido total del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

Los resultados expuestos en la presente sección serán analizados en la sección 7.6 del presente trabajo.

6.5.2. Altura significativa espectral, contenido onda larga del espectro

Desde la Figura 6.16 a la Figura 6.21 se exponen los resultados de distribución de altura significativa espectral correspondiente al contenido de onda larga del espectro. La distribución que se expone corresponde a la zona de la dársena del puerto de San Antonio, y cada figura corresponde a una de las condiciones de oleaje modeladas.

Los resultados que se exponen a continuación son analizados en la sección 7.6 del presente trabajo.

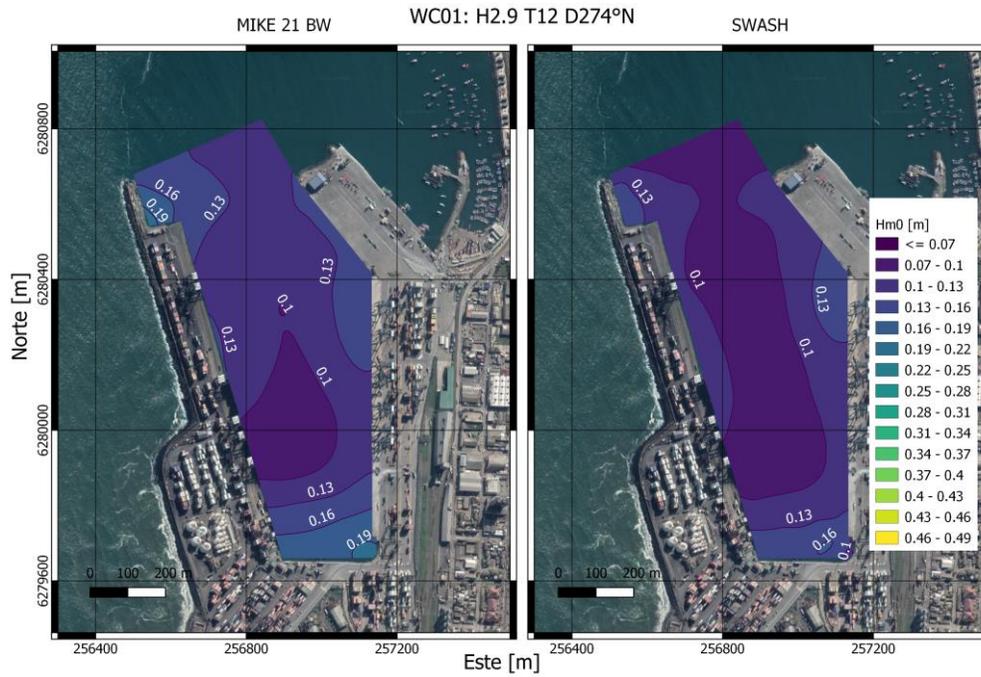


Figura 6.16: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

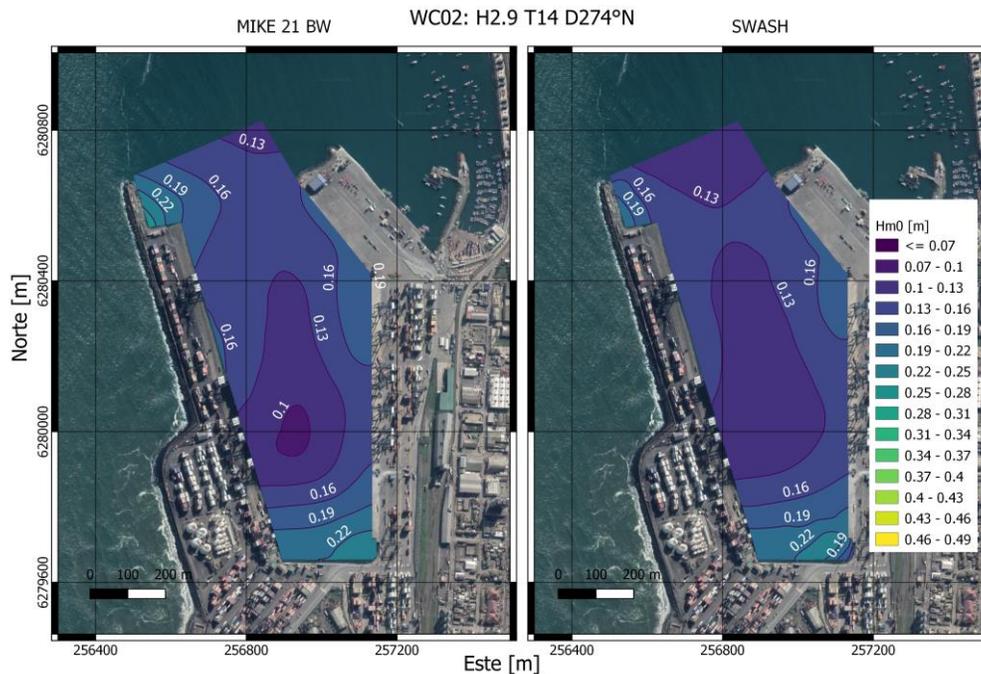


Figura 6.17: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

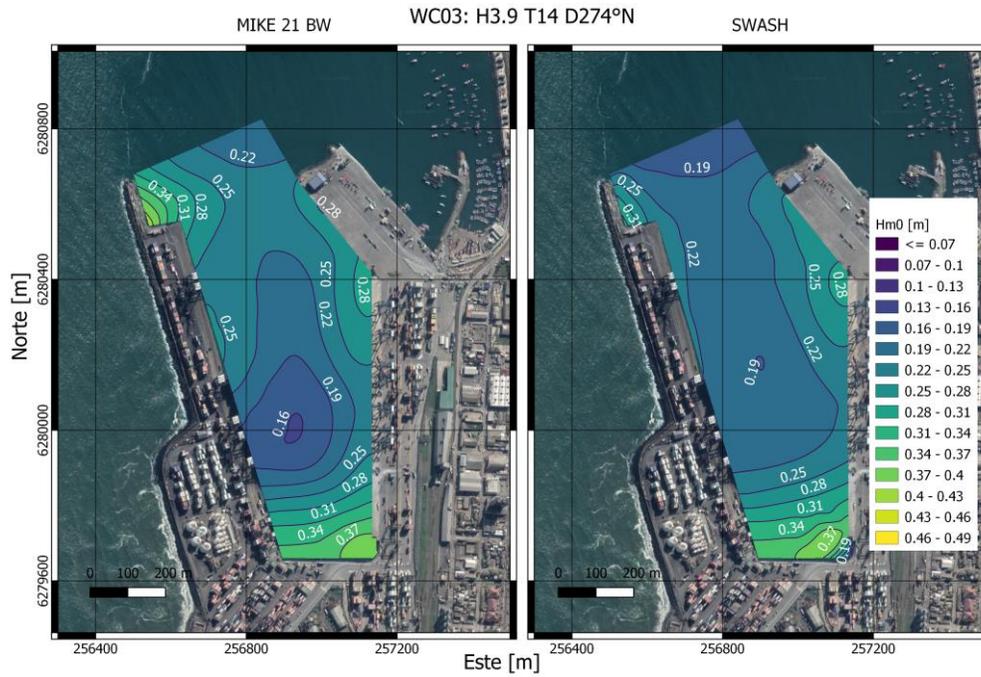


Figura 6.18: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

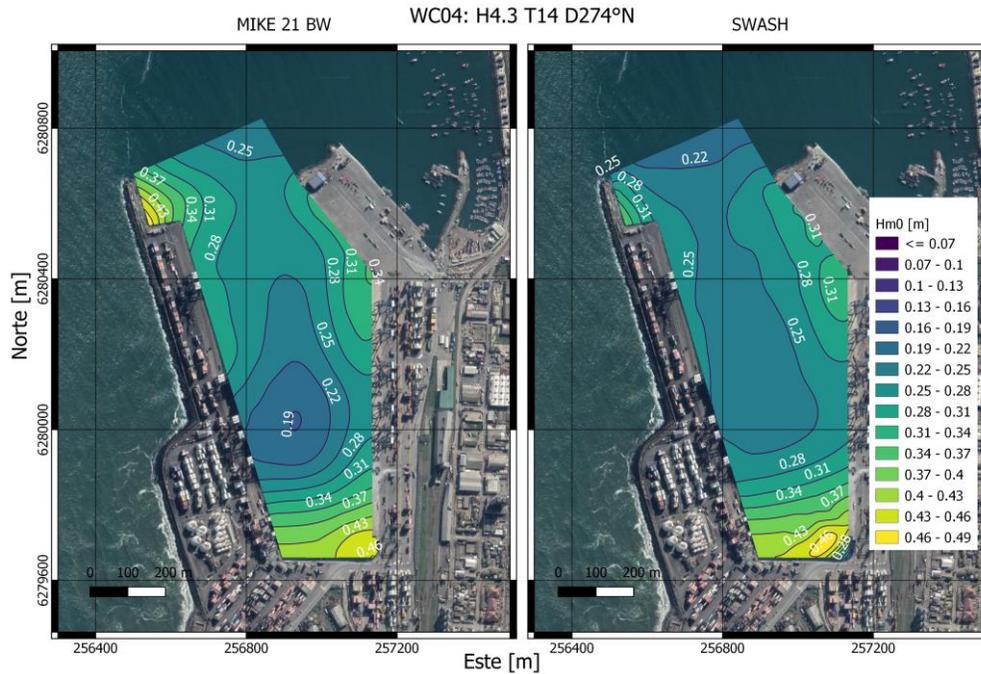


Figura 6.19: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

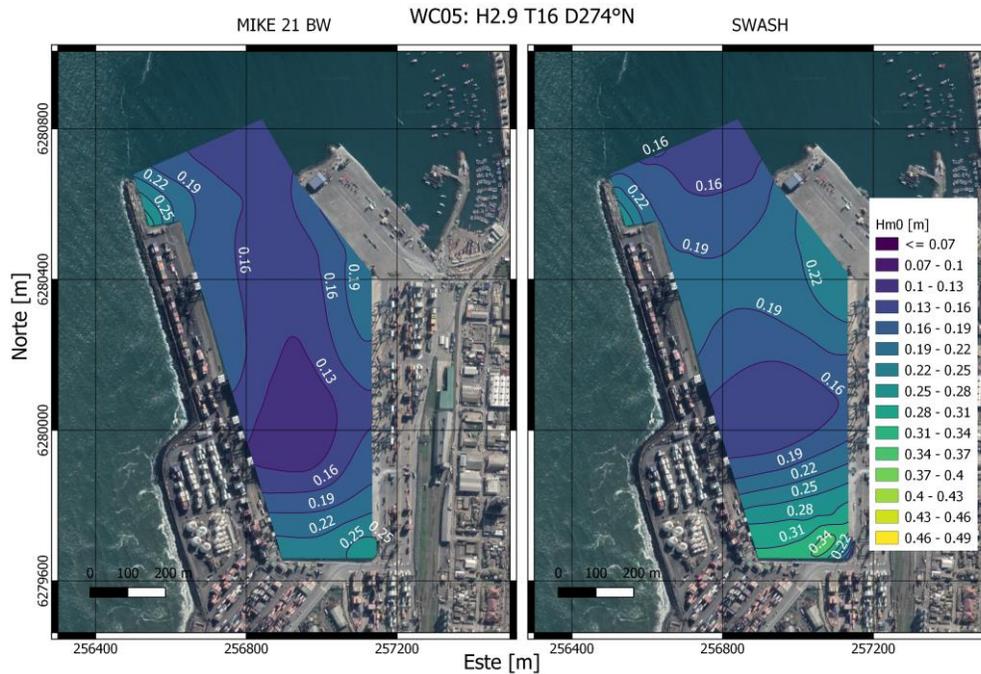


Figura 6.20: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

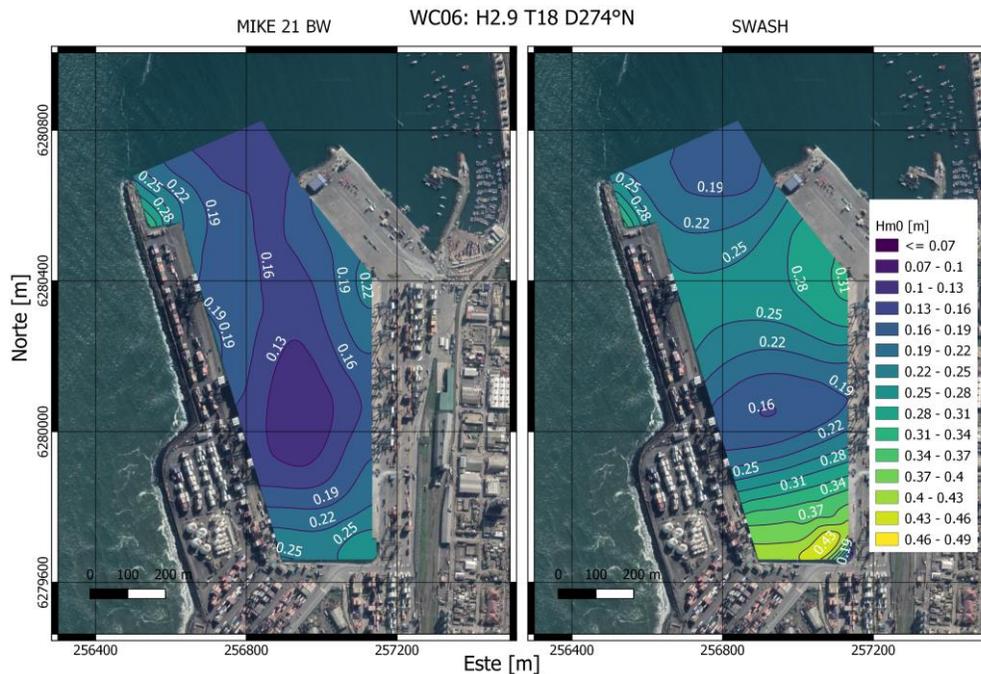


Figura 6.21: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido de ondas largas (periodo, 30s-300s) del espectro dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

6.6. Relación de los parámetros de la condición de borde con la altura significativa asociada al contenido de onda larga en P1

A continuación, se presentan los resultados respecto de la relación obtenida entre la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga en el punto P1 (al exterior de la dársena) con los parámetros configurados como condición de borde, como lo son la altura significativa espectral y el periodo peak.

La Figura 6.22 expone la relación de la altura significativa espectral asociada al contenido de ondas largas en un punto situado al exterior del puerto de San Antonio con la altura significativa espectral configurada en el espectro que se utiliza como condición de borde del modelo. Las tres condiciones de oleaje utilizadas (WC02H2.9T14D274, WC03H3.9T14D274 y WC04H4.3T14D274) para la obtención de dicha relación, varían solo en la magnitud de la altura significativa espectral asociada al espectro utilizado como condición de borde, mientras que el periodo peak de este es igual para las tres condiciones.

La Figura 6.23 expone la relación de la altura significativa espectral asociada al contenido de ondas largas en un punto situado al exterior del puerto de San Antonio con el periodo peak configurado en el espectro que se utiliza como condición de borde del modelo. Las cuatro condiciones de oleaje utilizadas (WC01H2.9T12D274, WC02H2.9T14D274, WC05H2.9T16D274 y WC06H2.9T18D274) para la obtención de dicha relación, varían solo en la magnitud del periodo peak asociado al espectro utilizado como condición de borde, mientras que la altura significativa espectral de éste es igual para las cuatro condiciones.

En

Tabla 6.7 se adjuntan las relaciones descritas en la presente sección. Estas son obtenidas desde el ajuste de curva sobre los datos.

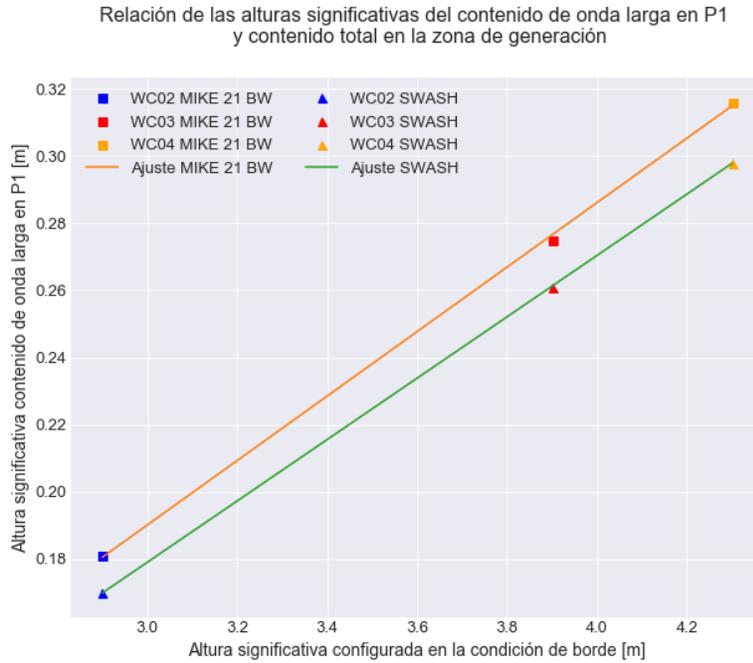


Figura 6.22: Relación entre la altura significativa espectral configurado en el espectro que se utiliza como condición de borde y la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga fuera del puerto de San Antonio (Punto P1).

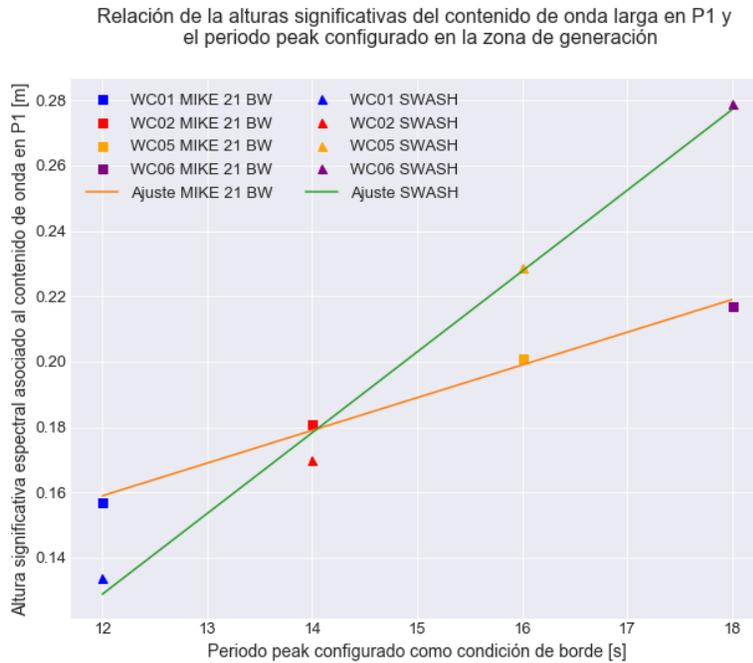


Figura 6.23: Relación entre el periodo peak configurado en el espectro que se utiliza como condición de borde y la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga fuera del puerto de San Antonio (Punto P1).

Capítulo 6: Resultados del modelado numérico con MIKE 21 BW y SWASH

Tabla 6.7: Relación de la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga en el punto P1 con los parámetros fundamentales del espectro ingresado como condición de borde.

| Relación | Ajuste lineal MIKE 21 BW | Ajuste lineal SWASH |
|--|------------------------------------|------------------------------------|
| Altura significativa espectral en la condición de borde v/s altura significativa espectral del contenido de onda larga en P1 | $Hm0_{LW} = 0.096Hm0_{CB} - 0.098$ | $Hm0_{LW} = 0.091Hm0_{CB} - 0.095$ |
| Periodo peak en la condición de borde v/s altura significativa espectral del contenido de onda larga en P1 | $Hm0_{LW} = 0.010T_{p-CB} - 0.101$ | $Hm0_{LW} = 0.025T_{p-CB} - 0.168$ |

Los resultados expuestos en la presente sección serán analizados en la sección 0 del presente trabajo.

6.7. Relación altura de onda corta al exterior del puerto con altura de onda larga en el punto P0 y los sitios

A continuación, se presentan los resultados respecto de la relación obtenida entre la altura significativa espectral de onda corta en el punto P1 (al exterior de la dársena) con la altura significativa espectral de onda corta en el punto P0.

Adicionalmente se presenta la relación de la altura significativa espectral del contenido de onda corta en el punto P1 con la altura significativa espectral del contenido de onda larga en cada uno de los sitios definidos en la Figura 3.2. Estas relaciones se presentan en la Tabla 6.8. Los gráficos correspondientes a dichas relaciones se encuentran en el Anexo C.

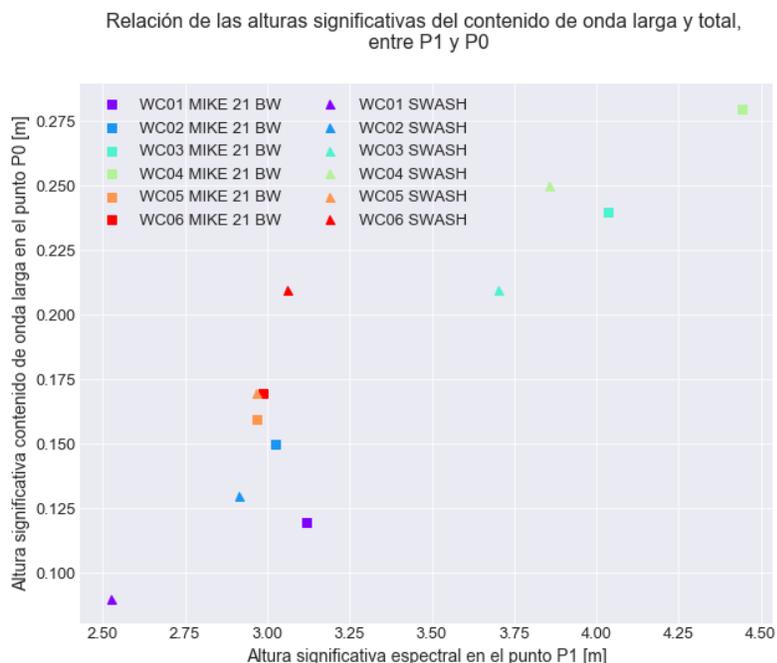


Figura 6.24: Relación entre la altura significativa espectral asociada al contenido de onda corta en el punto P1 con la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga del punto P0, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas.

Tabla 6.8: Relación entre la altura significativa espectral asociada al contenido de onda corta en el punto P1 con la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga de cada uno de los sitios del puerto de San Antonio.

| Sitio | Ajuste lineal MIKE 21 BW | Ajuste lineal SWASH |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 01 | $Hm0_{LW} = 0.092Hm0_{SW} - 0.109$ | $Hm0_{LW} = 0.116Hm0_{SW} - 0.140$ |
| 02 | $Hm0_{LW} = 0.090Hm0_{SW} - 0.101$ | $Hm0_{LW} = 0.111Hm0_{SW} - 0.140$ |
| 03 | $Hm0_{LW} = 0.102Hm0_{SW} - 0.136$ | $Hm0_{LW} = 0.132Hm0_{SW} - 0.184$ |
| 04 | $Hm0_{LW} = 0.111Hm0_{SW} - 0.155$ | $Hm0_{LW} = 0.149Hm0_{SW} - 0.209$ |
| 05 | $Hm0_{LW} = 0.069Hm0_{SW} - 0.081$ | $Hm0_{LW} = 0.104Hm0_{SW} - 0.155$ |
| 06 | $Hm0_{LW} = 0.086Hm0_{SW} - 0.098$ | $Hm0_{LW} = 0.094Hm0_{SW} - 0.103$ |
| Relación promedio | $Hm0_{LW} = 0.092Hm0_{SW} - 0.113$ | $Hm0_{LW} = 0.118Hm0_{SW} - 0.155$ |

Los resultados expuestos en la presente sección serán analizados en la sección 7.8 del presente trabajo.

6.8. Frecuencias resonantes

A continuación, se presentan los resultados correspondientes a los modos resonantes dentro de la dársena del puerto de San Antonio. Además, se presentan la distribución de altura significativa espectral asociada a cada uno de los modos resonantes obtenidos con los modelos MIKE 21 BW y SWASH.

Capítulo 6: Resultados del modelado numérico con MIKE 21 BW y SWASH

Los resultados que se exponen a continuación son analizados en la sección 7.9 del presente trabajo.

Tabla 6.9: Frecuencias resonantes determinadas con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH, presentes en la dársena del puerto San Antonio.

| Frecuencias de resonancia obtenidas con MIKE 21 BW [Hz] | Frecuencias de resonancia obtenidas con SWASH [Hz] |
|--|---|
| 0.003-0.006 | 0.003-0.006 |
| 0.006-0.010 | 0.006-0.010 |
| 0.010-0.015 | 0.010-0.014 |
| 0.015-0.020 | 0.014-0.020 |
| 0.020-0.033 | 0.020-0.033 |

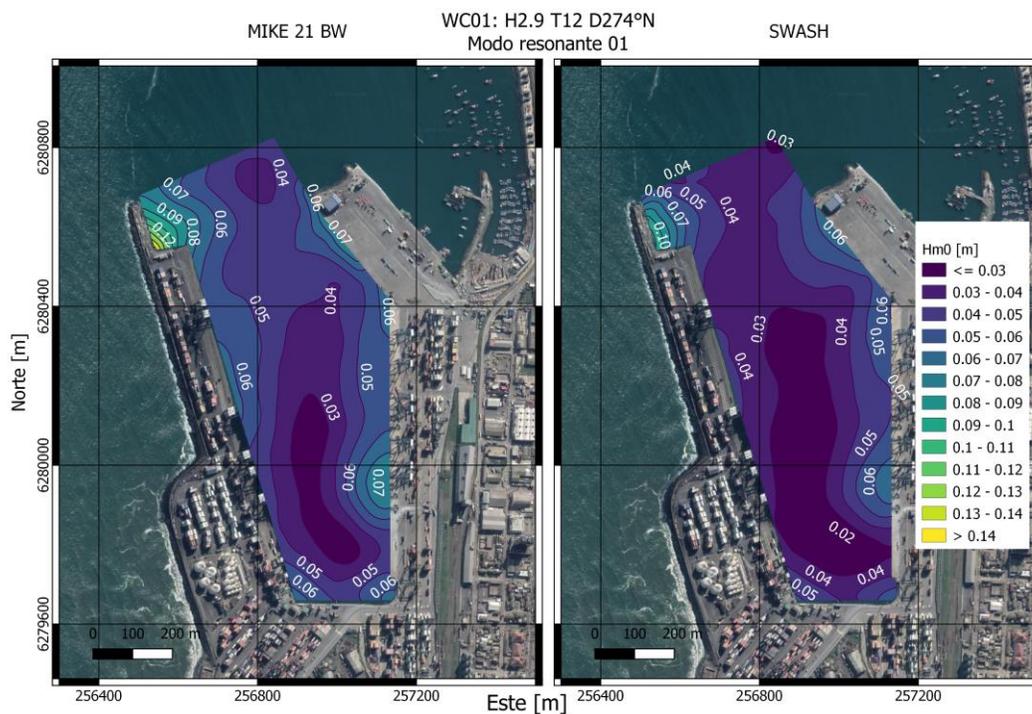


Figura 6.25: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

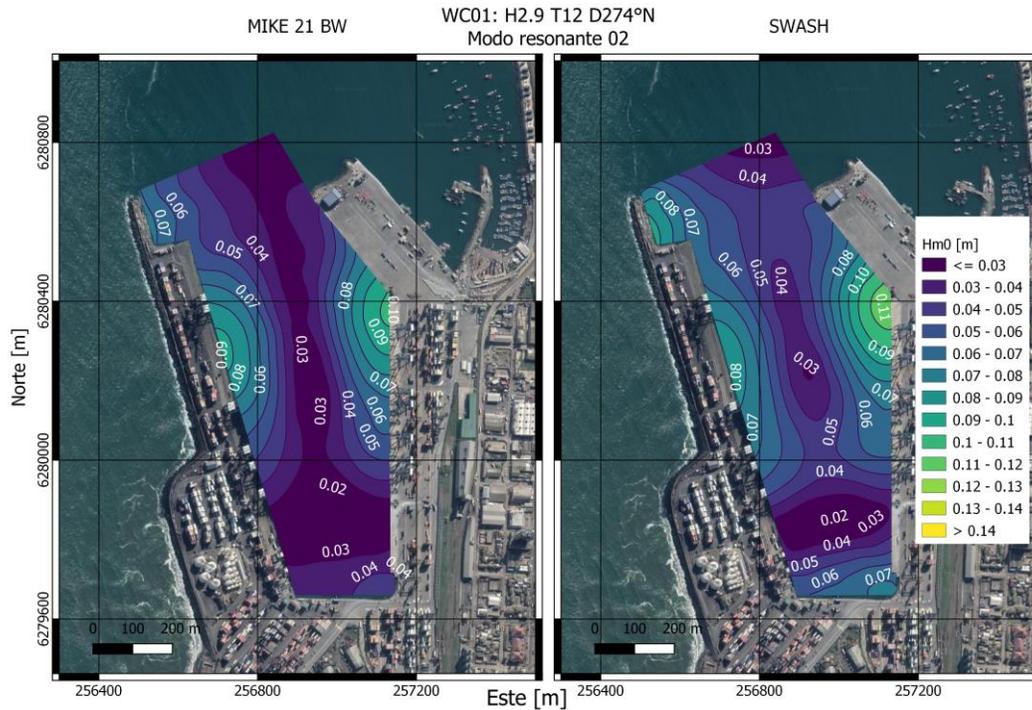


Figura 6.26: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

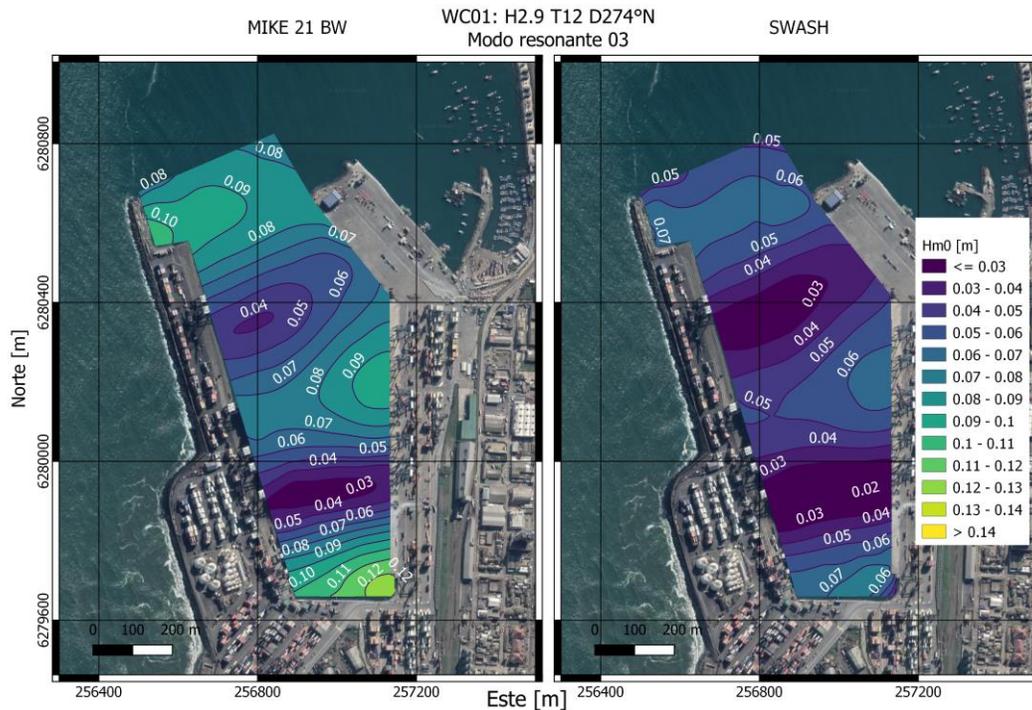


Figura 6.27: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

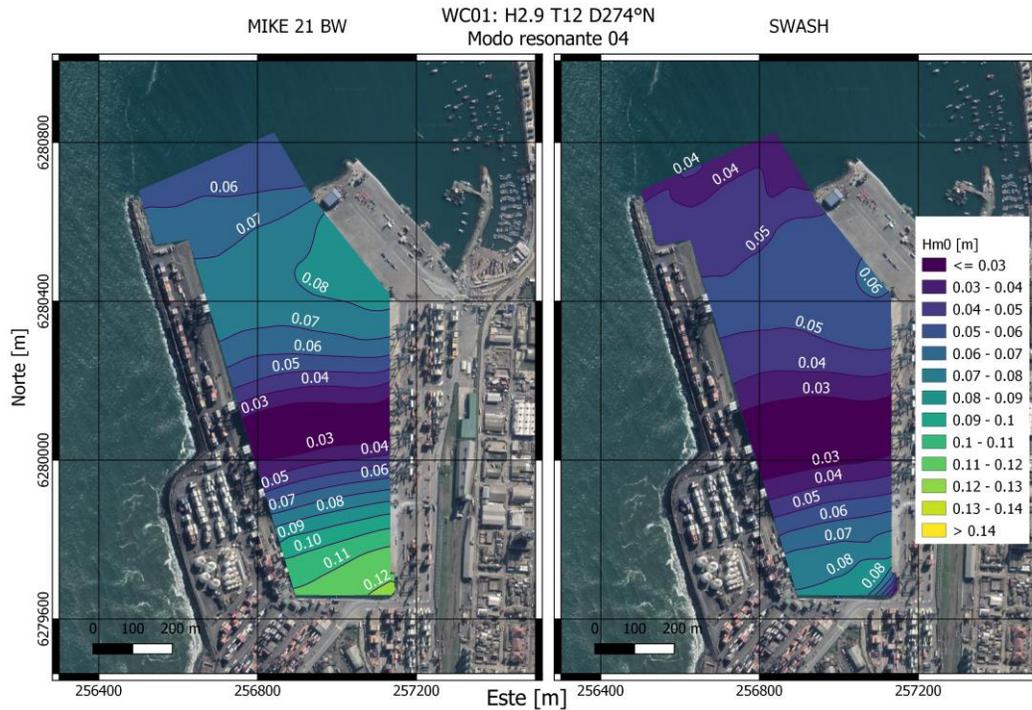


Figura 6.28: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

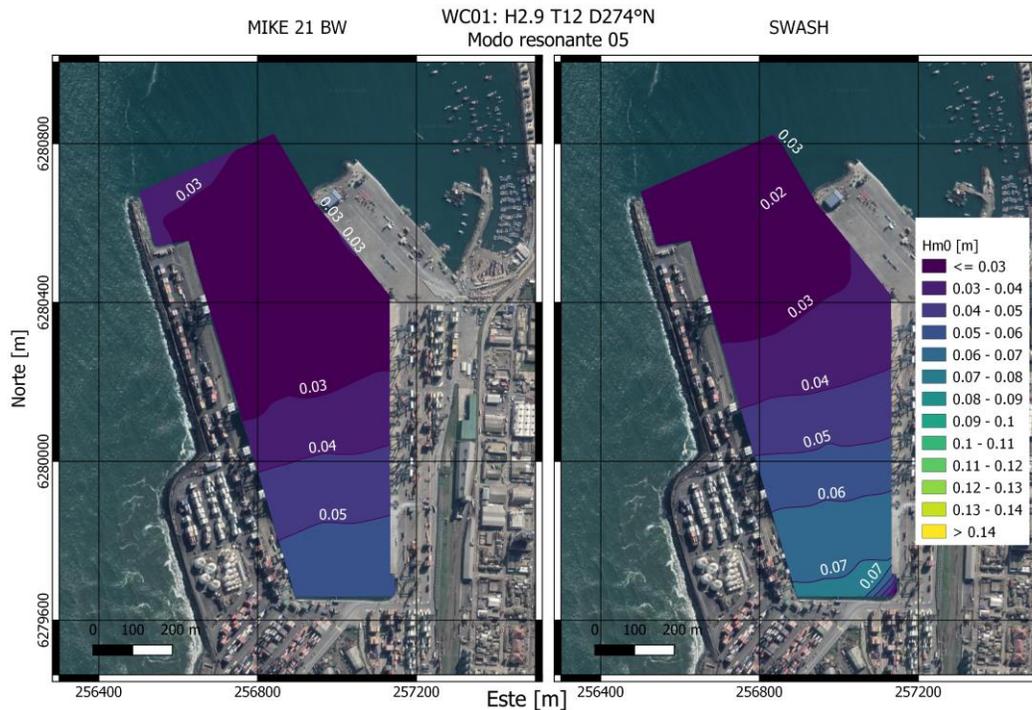


Figura 6.29: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 01. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

El resto de las distribuciones de la altura significativas asociadas a cada uno de los modos resonantes de cada una de las condiciones de oleaje, se encuentran adjuntas en el Anexo D.

6.9. Tiempo de cómputo

A continuación, se expone el tiempo que utilizan ambos softwares para computar cada uno de los modelos configurados.

Cabe mencionar que los modelos fueron ejecutados en 4 procesadores AMD Phenom(tm) II X4 965, los cuales trabajan en modo paralelo.

Tabla 6.10: Tiempo computacional utilizado por los modelos para el cálculo de las simulaciones.

| Condición de oleaje | Tiempo computacional MIKE 21 BW[hrs] | Tiempo computacional SWASH [hrs] |
|---------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 01 | 4.70 | 40.05 |
| 02 | 4.80 | 41.38 |
| 03 | 4.87 | 41.01 |
| 04 | 4.67 | 43.36 |
| 05 | 4.63 | 40.43 |
| 06 | 4.96 | 38.82 |
| Promedio | 4.77 | 40.84 |

Capítulo 7

7. Discusión de resultados

7.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza el correspondiente análisis de los resultados obtenidos con el modelado realizado a partir de los dos modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH. Los resultados fueron presentados en el Capítulo 6: Resultados del modelado numérico con MIKE 21 BW y SWASH.

7.2. Trayectorias

A partir de los resultados obtenidos con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH respecto a la cantidad de energía que ingresa al dominio del modelo (Tabla 6.1 y Tabla 6.2), se observa que la energía que ingresa al modelo MIKE 21 BW y SWASH son mayores y menores, respectivamente, en comparación a la energía configurada en el espectro utilizado como condición de borde. Las diferencias entre la energía configurada y la calculada no son considerables, ésta son en promedio del orden de 5% por sobre la energía configurada y 3% bajo la energía configurada para los modelos MIKE 21 BW y SWASH, respectivamente. A pesar de que la diferencia entre la energía de entrada real y la configurada no es considerable, esta puede ser propagada hacia adelante en el sentido de propagación de las ondas, condicionando de esta forma los resultados de sectores más cercanos a la costa. La diferencia puede ser producto de la construcción interna de la condición de borde (zona de generación).

A partir de los resultados obtenidos con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH respecto al comportamiento de la altura significativa espectral a lo largo de las trayectorias (Figura 6.1 y figuras adjuntas en el Anexo B), se observa que en general el valor de la altura significativa espectral en el punto de partida de las trayectorias (P1) es menor en SWASH, en contraste con el valor obtenido a través de MIKE 21 BW. Esto se presenta en 5 de los 6 casos simulados. Esta relación concuerda con la relación de la cantidad de energía real que ingresa con cada uno de los modelos.

Respecto al valor de la altura significativa espectral en el punto de llegada de las trayectorias, en general el valor que se obtiene con MIKE 21 BW es mayor que el obtenido con SWASH, esta relación también es consistente con la relación que existe entre la cantidad de energía real que ingresa en cada uno de los modelos numéricos.

Se puede observar también que los resultados no presentan grandes diferencias respecto a este valor en los puntos que se encuentran abrigados P0, P8, P9 y P10, los cuales pertenecen a las trayectorias T1, T4, T5 y T6 respectivamente. Las diferencias más grandes se presentan en los puntos que están completamente expuestos al oleaje,

P3 y P4, los que pertenecen a las trayectorias T2 y T3 respectivamente. Todo lo descrito con anterioridad puede deberse a la diferentes de capacidades de propagación de oleaje bajo una condición desafiante como lo es el cañón submarino que se encuentra frente al puerto de San Antonio, el cual conforma una especie de canal de entrada hacia el puerto. De todas formas, se tiene que considerar el hecho de que el cañón fue modificado, imponiendo una profundidad máxima de 40 metros.

7.3. Espectro completo

Los gráficos correspondientes a los espectros de oleaje obtenidos en el punto P0 son expuestos desde la Figura 6.2 a la Figura 6.7. Estos espectros tienen como finalidad comparar los resultados obtenidos desde el modelo físico realizado por HR Wallingford y los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH. Desde estas figuras se observa que existe similitud en cuanto a la forma que tienen los tres espectros. Adicionalmente, se puede observar que la densidad de energía disminuye considerablemente para frecuencias mayores a 0.125 [Hz], en los resultados obtenidos con MIKE 21 BW y SWASH. Dicho comportamiento en el caso de MIKE 21 BW guarda relación con la restricción (mencionada en la sección 5.3) respecto a la máxima frecuencia de oleaje que puede ser simulada por el modelo en el contexto del problema. La restricción está relacionada con la profundidad máxima del modelo y el periodo mínimo que puede ser simulado (valor máximo de kd indicado en la Tabla 2.2). En el caso del modelo SWASH, esta disminuye debido a la profundidad máxima configurada en el modelo. Este modelo también tiene restricciones respecto al valor máximo de kd que puede ser modelado (ver Tabla 2.2), sin embargo, esta restricción no es limitante como la que presenta el modelo MIKE 21 BW. Independientemente de lo expuesto anteriormente, se sospecha que la energía asociada a altas frecuencias que no logran ser modeladas, se redistribuye en el resto de frecuencias.

Adicionalmente a lo anterior, a partir de los espectros se observa que el T_{peak} asociado al contenido de onda larga es consistente entre los tres modelos, no así en cuanto a la magnitud de densidad de energía asociado a dicho periodo pico. Lo anterior se verá reflejado en los resultados de altura significativa espectral asociada al contenido de ondas largas.

Con conocimiento de todo lo expuesto con anterioridad se puede mencionar que ambos modelos numéricos son consistentes entre ellos y con el modelo físico realizado por HR Wallingford respecto a la propagación del oleaje desde la zona de generación hacia la costa.

7.4. Altura significativa espectral del contenido total del espectro

A partir de los resultados de altura significativa espectral del contenido total de frecuencias obtenidos desde el post proceso de los resultados de los tres modelos (ver Tabla 6.3, Tabla 6.4 y Figura 6.8). Se puede observar que,

- Los resultados de altura significativa espectral del contenido total obtenidos en el punto P0 a través del modelado con MIKE 21 BW, arrojan un valor alto del factor de habilidad predictiva (0.94), el que es calculado a través de la ecuación (2.1). Éste factor indica que en promedio los valores de altura significativa espectral obtenidos con MIKE 21 BW en el punto P0 tiene una diferencia de 6% respecto al valor obtenido con el modelado físico de HR Wallingford. Los resultados obtenidos con SWASH también arrojan un valor alto del factor de habilidad predictiva (0.93), indicando éste que en promedio los valores de altura significativa espectral obtenidos con SWASH tiene una diferencia de 7% respecto al valor obtenido con el modelado físico de HR Wallingford.
- Los valores del factor de habilidad predictiva (definido en la ecuación (2.1)) correspondiente a la comparación entre ambos modelos que se exponen en la cuarta columna de la Tabla 6.4, arroja que la diferencia porcentual promedio entre ambos modelos numéricos es de 6%.
- Desde la cuarta columna de la Tabla 6.4, se desprende que la diferencia entre las alturas significativas espectrales obtenida con ambos modelos crece en conjunto con el aumento del valor de la altura significativa configurada en la zona de generación (ver relación WC02H2.9T14D274, WC03H3.9T14D274 y WC04H4.3T14D274). Adicionalmente se observa que a medida que aumenta el valor del periodo peak configurado en la zona de generación, la diferencia de la altura significativa espectral obtenida con ambos modelos también aumenta (ver relación WC01H2.9T12D274, WC02H2.9T14D274, WC05H2.9T16D274 y WC06H2.9T18D274). Esta última relación también se aprecia en las comparaciones de los modelos respecto a los resultados obtenidos desde el modelo físico realizado por HR Wallingford.

Por lo tanto, a pesar de que existe una diferencia máxima de un 7% asociada a la altura significativa espectral, esta es aceptable ya que al considerarla en términos absolutos, esta es del orden de centímetros. Dicha diferencia puede asociarse a la diferencia identificada en la zona de generación o a la precisión de los modelos.

Cabe mencionar que al no considerar la batimetría real del sector que se modeló debido a, la limitación del modelo MIKE 21 BW expuesta, los resultados pueden diferir de la realidad, ya que el fenómeno de refracción que se da en la entrada de la dársena puede ser relevante, concentrando mayor o menor cantidad de energía.

7.5. Altura significativa espectral del contenido de onda larga del espectro

A partir de los resultados de altura significativa espectral del contenido total obtenidos desde el post proceso de los resultados de los tres modelos (ver Tabla 6.5, Tabla 6.6 y Figura 6.9). Se observar que,

- En todas las condiciones de oleaje modeladas con MIKE 21 BW se subestiman los resultados de la altura significativa espectral del contenido de onda larga en el punto P0 en comparación a los resultados obtenidos con la información del modelado físico realizado por HR Wallingford. Teniendo en promedio una subestimación de un 27%.
- En todas las condiciones de oleaje modeladas con SWASH se subestiman los resultados de la altura significativa espectral del contenido de onda larga en el punto P0 en comparación a los resultados obtenidos con la información del modelado físico realizado por HR Wallingford. Teniendo en promedio una subestimación de un 31%.
- En promedio la diferencia porcentual entre los resultados de los modelos numéricos respecto a la altura significativa espectral asociada al contenido de onda larga es de un 16%. Los resultados de ambos modelos numéricos presentan una mayor similitud entre ellos en comparación con el modelo físico desarrollado por HR Wallingford.
- Los resultados obtenidos a partir de la configuración de la condición de oleaje WC05H2.9T16D274 en MIKE 21 BW y SWASH subestiman el valor obtenido con el modelo físico realizado por HR Wallingford, esta subestimación es la más alta, aproximadamente un 50% respecto al valor obtenido con el modelo físico. La diferencia entre los resultados está relacionada con el peak presente en el contenido de onda larga asociada a la condición de oleaje WC05H2.9T16D274 que se observar en la Figura A.4. El cual puede deberse a una posible resonancia del puerto de San Antonio obtenida con el modelo físico de HR Wallingford, la cual no es obtenida con los modelos numéricos.

En vista de lo descrito con anterioridad, los resultados de altura significativa espectral del contenido de onda larga obtenidos con ambos modelos numéricos muestran una diferencia porcentual importante (aproximadamente 30%) al contrastarse con los resultados obtenidos con el modelo físico realizado por HR Wallingford. Por otro lado, cuando se comparan los resultados de ambos modelos numéricos entre sí, la diferencia porcentual es menor (aproximadamente 15%). Si bien la diferencia relativa entre los modelos numéricos y el modelo físico es importante, esta no es relevante para efectos del presente estudio, ya que, considerándola en forma absoluta, es del orden de centímetros.

No se puede concluir si los resultados obtenidos con los modelos numéricos se ajustan a la situación real a la que se ve enfrentado el puerto de San Antonio. Esto ya que los modelos están siendo comparados con los resultados de un único punto

del modelo físico, sobre los cuales existe incerteza respecto al ajuste que tienen estos con la situación en terreno. Es por ello que lo ideal hubiera sido comparar los resultados de los modelos numéricos con mediciones de campo en varios puntos dentro y fuera del puerto de San Antonio (no se realiza dicha comparación por el costo económico asociado a las mediciones de campo). No obstante, la comparación de los modelos numéricos con el modelo físico es válida como aproximación del correcto funcionamiento de los modelos numéricos frente a las ondas de infragravedad.

De esta manera se puede afirmar que ambos modelos simulan adecuadamente la transferencia de energía de ondas de mayor frecuencia hacia ondas de frecuencias menores, siendo capaces de formar y propagar las ondas de infragravedad.

7.6. Distribución de la altura significativa espectral del contenido total y del contenido de onda larga dentro de la dársena del puerto de San Antonio

Para efectos del presente trabajo de título solo se comparan las distribuciones de altura significativa espectral obtenida por ambos modelos numéricos, esto debido a la ausencia de datos (mediciones de campo o de modelos físicos) en el sector de la dársena del puerto de San Antonio.

Los resultados respecto a las distribuciones de la altura significativa espectral del contenido total y del contenido de onda larga que se obtienen con ambos modelos (Figura 6.10 a la Figura 6.21) son similares en cuanto a los patrones de energía que presentan (sectores donde se encuentran las zonas altas, intermedias y bajas de energía), pero difieren en cuanto a la magnitud (zonas de alta, intermedia y baja energía determinadas con SWASH tienen una magnitud diferente que las mismas zonas de alta, intermedia y baja energía determinadas con MIKE 21 BW). En general los resultados de la altura significativa espectral dentro de la dársena obtenidos con el modelo MIKE 21 BW son mayores que los obtenidos con el modelo SWASH (ver la escala de colores de las figuras mencionadas). Esta diferencia de magnitud puede ser explicada por la diferencia que existe en la altura significativa espectral que se define como condición de borde. Si bien se configura la misma condición de borde para ambos modelos, los resultados de la altura significativa espectral obtenida 100 metros delante de la zona de generación no son iguales a la altura significativa espectral configurada como condición de borde (ver Tabla 6.1 y Tabla 6.2), éstas debiesen ser iguales, debido a la baja disipación de energía que existe en aguas profundas (sector en el cual se encuentran los resultados obtenidos 100 metros delante de la zona de generación). A pesar de lo anterior, en general no hay diferencias considerables en los resultados de altura significativa espectral del contenido total y contenido de ondas largas dentro del puerto de San Antonio.

Adicionalmente, a partir de los resultados obtenidos con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH respecto a la distribución de la altura significativa espectral

asociada al contenido total y asociado al contenido de ondas largas dentro de la dársena del puerto de San Antonio (Figura 6.10 a la Figura 6.21), se observan las siguientes relaciones:

- En las distribuciones de altura significativa espectral de la Figura 6.10, Figura 6.11, Figura 6.12 y Figura 6.13, hay un aumento en la energía dentro de la dársena a medida que aumenta la altura significativa espectral del espectro que se utiliza como condición de borde en los modelos. Esta relación se observa con la disminución de las áreas de niveles de energía menores compensados con el aumento en el área de niveles de energía mayores.
- En las distribuciones de la altura significativa espectral obtenidas con SWASH que se aprecian en la, Figura 6.11, Figura 6.14 y Figura 6.15, hay un aumento en la energía presente dentro de la dársena a medida que aumenta el periodo peak del espectro que se utiliza como condición de borde en el modelo.

Por lo tanto, con ambos modelos se obtienen resultados consistentes respecto a la distribución de la altura significativa espectral tanto del contenido total como del contenido de ondas largas dentro de la dársena, en vista de lo anterior se puede concluir que los modelos tienen una interacción adecuada de la geometría de la dársena con el oleaje simulado. Esto se afirma con la consistencia que existe entre los patrones de energía que se presentan en las figuras enunciadas en la presente sección.

7.7. Relación de los parámetros del espectro configurado como condición de borde y la altura significativa del contenido de onda larga en P1

De las relaciones de la altura significativa asociado a onda larga con los parámetros que definen al espectro (altura significativa espectral y periodo peak) utilizado como condición de borde obtenidas con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH se puede observar:

- Figura 6.22: Relación directamente proporcional entre la altura significativa espectral asociada al espectro de oleaje configurado como condición de borde y la altura significativa espectral del contenido de onda larga presente en el punto P1. Esta relación se obtiene con ambos modelos pero con una diferencia de magnitud en el factor de proporción de aproximadamente 5%. Dicha diferencia se puede observar en la
- Tabla 6.7.
- Figura 6.23: Relación directamente proporcional entre el periodo peak asociado al espectro de oleaje configurado como condición de borde y la altura significativa espectral del contenido de onda larga presente en el punto P1. Esta relación se obtiene con ambos modelos pero con diferencias de magnitud.

Con la obtención de la relación del periodo peak asociado al espectro configurado como condición de borde y la altura significativa asociado al contenido de ondas

largas en aguas intermedias, se comprende la importancia del fenómeno de penetración de ondas largas en los puertos expuestos a oleajes del tipo swell (periodos peak entre los 12 y 18 segundos), como lo son los puertos expuestos al oleaje del océano pacifico.

7.8. Relación altura de onda corta al exterior del puerto con altura de onda larga en el punto P0 y los sitios

A partir de los resultados obtenidos con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH respecto a las relaciones de altura significativa espectral del contenido total fuera de la dársena con la altura significativa espectral del contenido de onda larga dentro de la dársena (Figura 6.24 y figuras contenida en el Anexo C), se observa que las diferencia más grandes entre los resultados de altura significativa espectral del contenido de onda larga promedio en los sitios entre ambos modelos, se presenta en las simulaciones de las condiciones de oleaje WC05H2.9T16D274 y WC06H2.9T18D274, las cuales simulan las condición con un alto valor del periodo peak del espectro utilizado como condición de borde en el modelado.

Las relaciones de la altura significativa espectral asociada al contenido total y a la onda larga (Tabla 6.8) son consistentes entre ambos modelos. Con MIKE 21 BW se obtiene que el promedio de la altura significativa espectral del contenido de onda larga en los sitios es un 9.2% de la altura significativa espectral del contenido total que hay en el punto P1, mientras que en SWASH dicha relación es de un 11.8%. Por lo tanto, la relación obtenida con MIKE 21 BW y con SWASH tienen una diferencia de un 2.6%, siendo la de SWASH mayor. Dicha diferencia es pequeña considerándola en términos absolutos, del orden de centímetros.

7.9. Modos resonantes

A partir de los resultados obtenidos con los modelos numéricos MIKE 21 BW y SWASH respecto a los modos resonantes de la dársena del puerto de San Antonio expuestos en la Tabla 6.9, se observa que ambos modelos son consistentes entre ellos. Esto confirma la adecuada interacción que existe entre los modelos numéricos y la geometría de la dársena. Esto se afirma con conocimiento de la estrecha relación que existe entre los modos resonantes y la geometría de la dársena.

Con respecto a los valores de los rangos de frecuencias que definen a los modos resonantes, se observa que existe una diferencia entre los resultados de ambos modelos respecto de los modos resonantes 3 y 4. La frecuencia inferior del modo resonante 4 (corresponde a la frecuencia superior del modo resonante 3) es diferente para ambos modelos. Sin embargo, esta diferencia es pequeña y tiene un valor de 0.001 [Hz].

Respecto a la distribución de altura significativa espectral asociada a cada uno de los modos resonantes (Figura 6.25 a la Figura 6.29) que se obtiene con ambos modelos, se observa que hay consistencia en cuanto a los patrones de distribución de energía (mismas ubicación de las zonas de alta y baja energía), y posición de los nodos y antinodos dentro de la dársena del puerto de San Antonio. La diferencia entre estos resultados radica en la magnitud de la energía alojada dentro de la dársena del Puerto

7.10. Comparación cualitativa de la construcción y ejecución de los modelos numéricos, sensación usuario

A continuación, se realiza una comparación cualitativa de la construcción y ejecución de los modelos numéricos utilizados en el presente trabajo de título.

MIKE 21 BW es un modelo comercial del tipo *phase resolving*, el cual es altamente utilizado en la industria de la ingeniería de costas. Este se encuentra validado por diferentes estudios respecto a la propagación de ondas de infragravedad. Por otro lado, el modelo SWASH es un modelo de código abierto, que viene siendo desarrollado hace aproximadamente 9 años, por lo cual cuenta con poca cantidad de estudios que lo validen en el campo de la formación y propagación de ondas de infragravedad.

Teniendo en consideración la bibliografía presentada en el Capítulo 2 se puede mencionar que SWASH es un modelo numérico capaz de simular con un nivel de precisión alto el fenómeno de dispersión de frecuencia, permitiendo así la interacción entre las ondas de diferentes frecuencias. Dicha interacción ocurre debido a la diferencia de velocidad que existe entre ondas de distinta frecuencia. SWASH tiene un nivel aceptable en la precisión de la simulación de este fenómeno, ya que tiene la opción de fraccionar verticalmente el modelo, aumentando así la precisión cada vez que se aumenta el número de capas verticales configurado. Por otro lado, MIKE 21 BW aumenta la precisión de la dispersión de frecuencia, aumentando el orden de la derivada de las variables que se relacionan con el fenómeno. Esta variable no es configurada por el usuario en MIKE 21 BW. Las ondas de infragravedad son generadas debido a la interacción no lineal de ondas cortas, por lo tanto, el modelo numérico SWASH puede reproducir con mayor precisión el fenómeno de penetración de ondas de infragravedad en el puerto de San Antonio que el modelo MIKE 21 BW. La afirmación anterior queda sujeta a la cantidad de capas verticales que se configuren en el modelo SWASH.

Respecto a las limitaciones de ambos modelos se puede mencionar que, el modelo MIKE 21 BW presenta limitaciones más estrictas respecto al valor máximo de la relación entre número de onda y profundidad (kd) que el modelo SWASH. Es por ello que en el modelo SWASH es capaz de simular una gama más amplia de frecuencias y también de trabajar con la batimetría real.

Con los registros de tiempo de cómputo de los softwares MIKE 21 BW y SWASH en la ejecución de los modelos que se adjuntan en la Tabla 6.10, se puede observar que los modelos numéricos ejecutados por SWASH tienen una demanda computacional mucho mayor (considerando el tiempo de cómputo) que los que se ejecutan con MIKE 21 BW. En promedio los modelos ejecutados en MIKE 21 BW tardan 4.77 horas, mientras que los ejecutados con SWASH tardan en 40.84 horas. El modelo MIKE 21 BW tiene un tiempo de ejecución promedio aproximadamente 9.5 veces menor que el que requiere el modelo SWASH.

Capítulo 8

8. Conclusiones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones

En algunas ocasiones el movimiento excesivo que presentan las embarcaciones atracadas y la ruptura de las líneas de amarre, son resultado de la penetración de ondas de infragravedad en los puertos.

En uno de los principales puertos chilenos, el puerto de San Antonio, se observó al inicio de la operación del terminal costanera, movimientos excesivos de las naves que operaban en el centro del terminal. Dichos movimientos son inducidos por oleaje de infragravedad y la interacción que tiene este con la geometría del puerto. Es por esto, y la disponibilidad de datos, que se ha seleccionado el puerto de San Antonio para el modelado numérico del presente trabajo de título.

Los modelos de propagación de oleaje del tipo *phase resolving* son una herramienta apropiada para el modelado de propagación de oleaje en puertos en los que se espera, o sospecha que el fenómeno de resonancia con la geometría del puerto sea relevante. Esto se debe a que son capaces de modelar, la propagación de las distintas ondas que viajan en un tren de olas y su interacción en la infraestructura portuaria como rompeolas, muelles, paredes verticales y defensas costeras permitiendo determinar correctamente la agitación en una dársena. Dichas interacciones transfieren energía a ondas de frecuencias bajas, esto es lo que permite la formación de ondas de infragravedad. Este tipo de ondas son las responsables de la resonancia antes mencionada que corresponde al objeto de este estudio.

Con la finalidad de modelar el fenómeno de penetración de onda larga en el puerto de San Antonio, se utilizaron los modelos numéricos del tipo *phase resolving* MIKE 21 BW y SWASH. Se utiliza el modelo MIKE 21 BW ya que, además de ser uno de los modelos más utilizados en el rubro de la ingeniería de costas, se encuentra altamente validado por una serie de estudios en el campo de ondas de infragravedad. Por otra parte, se utiliza el modelo SWASH con el interés de comparar los resultados obtenidos con MIKE 21 BW, y así investigar la precisión de estos modelos frente al fenómeno de propagación de ondas de infragravedad. SWASH es un modelo numérico de código abierto, que ha sido poco investigado respecto a la precisión de este fenómeno.

Los espectros que se configuran como condición de borde son los encargados de excitar la masa de agua simulada por ambos modelos y de esta manera propagar las ondas desde la zona de generación hacia la costa. Ambos modelos son capaces de

ingresar una cantidad de energía consistente con la cantidad de energía que se configura como condición de borde.

A partir de los resultados de las trayectorias se verifica que ambos modelos son capaces de simular correctamente el fenómeno de propagación de oleaje desde aguas intermedias hacia aguas someras. Esto lo realizan correctamente incluso en una condición desafiante (respecto a la batimetría) como lo es el cañón submarino que se encuentra frente al puerto de San Antonio.

Tal como concluyen los estudios de Suzuki et. al (2014) y De Roo et. al (2015), ambos modelos simulan correctamente la propagación del oleaje. Los resultados obtenidos respecto a la propagación de onda corta de ambos modelos (resultados de altura significativa espectral) son consistentes entre ellos y también con los resultados obtenidos del el modelado físico realizado por HR Wallingford.

A pesar de que ambos modelos se basan en ecuaciones de propagación de oleaje distintas, ambos son capaces de generar y propagar ondas de infragravedad correctamente desde la zona de generación hacia la costa. Esto se aprecia con la similitud entre los resultados de altura significativa espectral asociada a onda larga de ambos modelos numéricos y del modelo físico desarrollado por HR Wallingford.

Ambos modelos son capaces de representar correctamente la penetración de oleaje y específicamente la penetración de ondas del tipo de infragravedad en el puerto de San Antonio. Se afirma esto por la similitud que existe entre los resultados obtenidos por los modelos respecto a la distribución de altura significativa espectral asociada al contenido total y al contenido de onda larga.

A partir de las relaciones de altura significativa espectral del contenido total de frecuencias que hay al exterior del puerto, con la altura significativa espectral del contenido de onda larga en los sitios dentro del puerto obtenida con ambos modelos, se concluye que dicha relación es consistente entre ambos modelos y aproximadamente es del orden de 10% para las condiciones modeladas.

Se observa una alta similitud en los patrones de los modos resonantes obtenidos dentro de la dársena del puerto San Antonio. Las diferencias entre estos son aproximadamente del orden de centímetros. Es debido a lo anterior que se concluye que ambos modelos simulan correctamente la interacción de ondas largas con la geometría del puerto de San Antonio.

El costo computacional del modelo SWASH es significativamente mayor comparado con el de MIKE 21 BW, y este aumenta a medida que se incrementa el número de capas verticales que se configuran en el modelo. Aumentar la precisión del modelo SWASH requiere un aumento considerable en el costo computacional de ejecución del modelo. Para el estudio se analizó el número de capas, y se concluyó que con una

cantidad de 4 capas verticales se tiene una precisión adecuada con un buen compromiso de tiempo de modelado.

A partir de todo lo expuesto con anterioridad se puede afirmar que ambos modelos obtienen resultados similares en el campo de las ondas largas. Por otro lado, existe una diferencia significativa respecto a la demanda computacional que requiere la ejecución de cada uno de los modelos. En base a lo expuesto en el presente trabajo, se puede concluir que, para el caso del modelado del puerto de San Antonio, el desempeño del modelo MIKE 21 BW se encuentra por sobre el del modelo SWASH, esto considerando el compromiso que existe entre el tiempo de modelado y la consistencia de los resultados.

8.2. Trabajo futuro

El presente trabajo de título cumplió el objetivo de comparar el desempeño de los modelos MIKE 21 BW y SWASH en el campo de las ondas largas, considerando la misma configuración de sus capas de entrada y variables fundamentales. Sin embargo, en el presente trabajo realizado no se contempló la batimetría real del escenario modelado, esto debido a las limitantes que presenta modelo MIKE 21 BW. Por lo tanto, un estudio de interés sería modelar con SWASH considerando la batimetría real del sector, y comparar dichos resultados con los resultados expuesto en el presente trabajo.

El presente trabajo, también motiva a desarrollar estudios respecto al *downtime* asociado a la penetración de ondas largas en la dársena de los puertos. Junto a lo anterior, se puede analizar la implementación de dispositivos del tipo *shoretension*⁶, los cuales permiten una reducción del *downtime* asociado al fenómeno de penetración de onda larga en la dársena.

⁶ Sistema de amarre dinámico desarrollado por K.R.V.E. (Koninklijke Roeiers Vereniging Eendracht), que tiene por objetivo la disminución de los movimientos de la nave producto de agentes forzantes (Oleaje, resonancia, etc)

9. Bibliografía

Alavantas, N. (2015). Investigation of infragravity waves in a two-dimensional domain using a non-hydrostatic numerical model, SWASH(master thesis). University of Twente, Netherlands.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, F., Winckler, P., Molina, M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso

De Roo, S., Suzuki, T., Kolokythas, G. K., Zhao, G., Verwaest, T. (2015). Numerical modelling of 2d wave transformation processes from nearshore to a shallow foreshore: comparison between the MIKE21, Swash and XBeach models, *in: E-proceedings of the 36th IAHR World Congress 28 June - 3 July, 2015, The Hague, the Netherlands*. pp. [1-6].

DHI. (2017). MIKE 21 BW. Boussinesq Waves Module. User Guide.

Gierlevsen, T., Hebsgaard, H., & Kirkegaard, J. (2001). Wave Disturbance Modelling in the Port of Sines, Portugal - with special emphasis on the long period oscillations. International Conference on Port and Maritime R&D and Technology. Singapore.

González-Marco, D., Sierra, J. P., Fernández de Ybarra, O., & Sánchez-Arcilla, A. (2008). Implications of long waves in harbor management: The Gijón port case study. *Ocean & Coastal Management*, 51(2), 180–201.

Henderson, S. & Bowen, A. (2002). Observations of surf beat forcing and dissipation. *Journal of Geophysical Research*, 107, 14-10–14-10

Henderson, S. M., Guza, R. T., Elgar, S., Herbers, T. H. C., & Bowen, A. J. (2006). Nonlinear generation and loss of infragravity wave energy. *Journal of Geophysical Research*, 111.

Herbers, T.H.C., Elgar, S., and Guza, R.T. (1995) Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 100, 24863–24872.

Holthuijsen, L.H. (2007) *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press, Cambridge.

Kofoed-Hansen, H., Kerper, D. R., Sørensen, O. R., & Kirkegaard, J. (2005). Simulation of Long Wave Agitation in Ports and Harbours using a Time-domain Boussinesq Model. *Proceedings of Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis-Waves*. Madrid, Spain.

Bibliografia

Longuet-Higgins, M. S., and Stewart, R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. *J. Fluid Mech.*, 13, 481-504.

López, M., & Iglesias, G. (2014). Long wave effects on a vessel at berth. *Applied Ocean Research*, 47, 63-72.

Madsen, P. A. (1983). Wave reflection from a vertical permeable wave absorber. *Coastal Engineering*, 7(4), 381–396.

Masterton, S. & Ewans, K. (2008) Characteristics of the Infragravity Wave Climate. Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal, June 15–20, 2008.

Monteban, D. (2016). Numerical modelling of wave agitation in ports and access channels, a comparison study between SWASH and MIKE 21 bw. Master. Delft University of Technology.

Munk, W. (1950). Origin and generation of waves, Proc. 1st Conf. Coastal Engineering (Long Beach), New York, ASCE, pp. 1–4.

Rijnsdorp, D. P., Smit, P. B., & Zijlema, M. (2012). Non-hydrostatic modelling of infragravity waves using Swash. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), Currents-27.

Rijnsdorp, D. P., Smit, P. B., & Zijlema, M. (2014). Non-hydrostatic modelling of infragravity waves under laboratory conditions. *Coastal Engineering*, 85, 30–42.

Roelvink, D., Van Dongeren, A., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., de Vet, L., Nederhoff, K., & Quataert, E. (2015). *XBeach Technical Reference: Kingsday Release. Model description and reference guide to functionalities*. Rotterdam, Paises Bajos.

Stuart, D., Toms, G., Luger, S., & Rossouw, M. (2014). Characterising long wave agitation in the port of Ngqura using a Boussinesq wave model. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 30.

Suzuki, T., Gruwez, V., Bolle, A., and Verwaest, T. (2012). Wave penetration into a shallow marinas study for Blankenberge in Belgium. In Book of abstracts of the 4th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection-Coastlab12 (pp. 17-20).

The SWASH Team (2019). SWASH User Manual – SWASH version 5.01A. Recuperado de: <https://www.tudelft.nl/en/ceg/about-faculty/departments/hydraulic-engineering/sections/environmental-fluid-mechanics/research/swash/>

Bibliografia

Thomson, J., Elgar, S., Raubenheimer, B., Herbers, T. & Guza, R. (2006). Tidal modulation of infragravity waves via nonlinear energy losses in the surfzone. *Geophysical Research Letters*, 33(5).

Toffoli, A., & Bitner-Gregersen, E. M. (2017). Types of Ocean Surface Waves, Wave Classification. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, 1–8.

Van Dongeren, A., Battjes, J., Janssen, T., van Noorloos, J., Steenhauer, K., Steenbergen, G., & Reniers, A. (2007). Shoaling and shoreline dissipation of low-frequency waves. *Journal of Geophysical Research*, 112.

Van Rijn, L. C. (2011). *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas, and oceans*, Aqua Publications.

Zijlema, M., Stelling, G., & Smith, P. (2011). An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in costal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.

Anexos

Anexo A

Espectros de las condiciones de oleajes modeladas

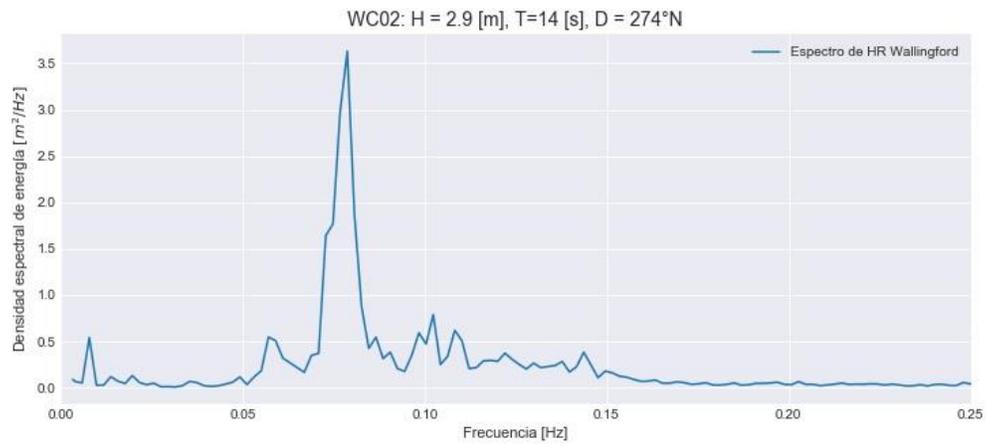


Figura A.1: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 02 asociado al punto P0 del modelo

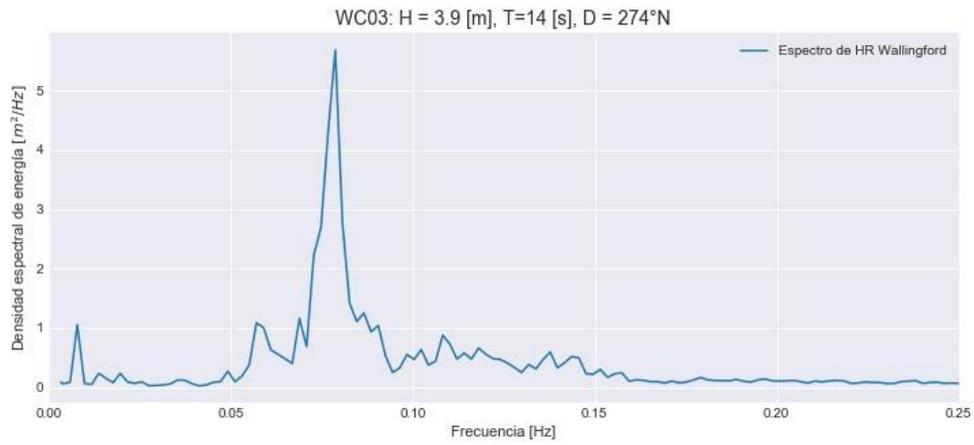


Figura A.2: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 03 asociado al punto P0 del modelo

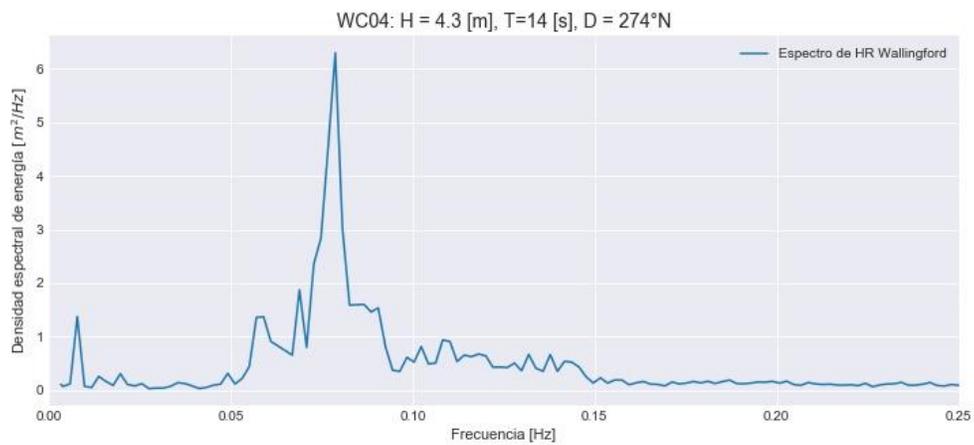


Figura A.3: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 04 asociado al punto P0 del modelo

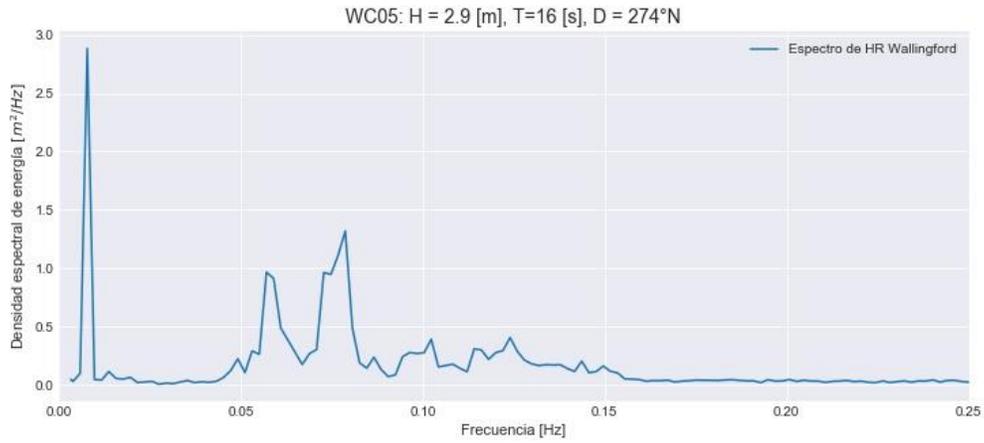


Figura A.4: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 05 asociado al punto P0 del modelo

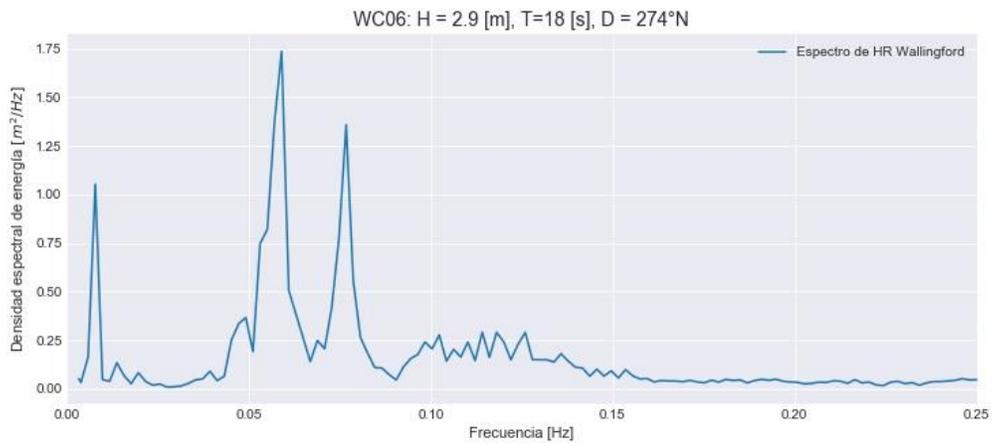


Figura A.5: Espectro de oleaje de la condición de oleaje 06 asociado al punto P0 del modelo

Anexo B

Comportamiento de la altura significativa espectral a lo largo de las trayectorias

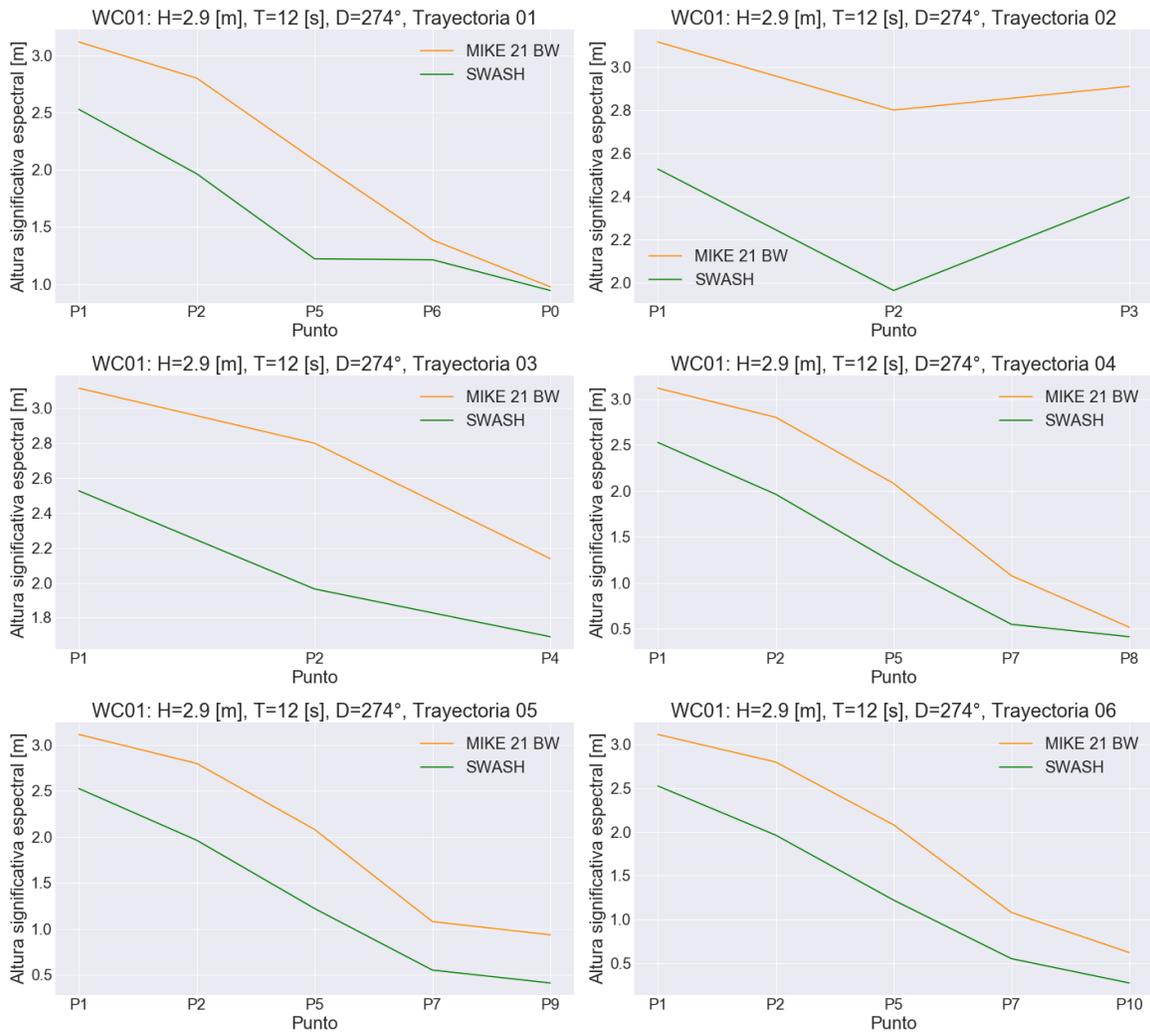


Figura B.1: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 01 (WC01H2.9T12D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3

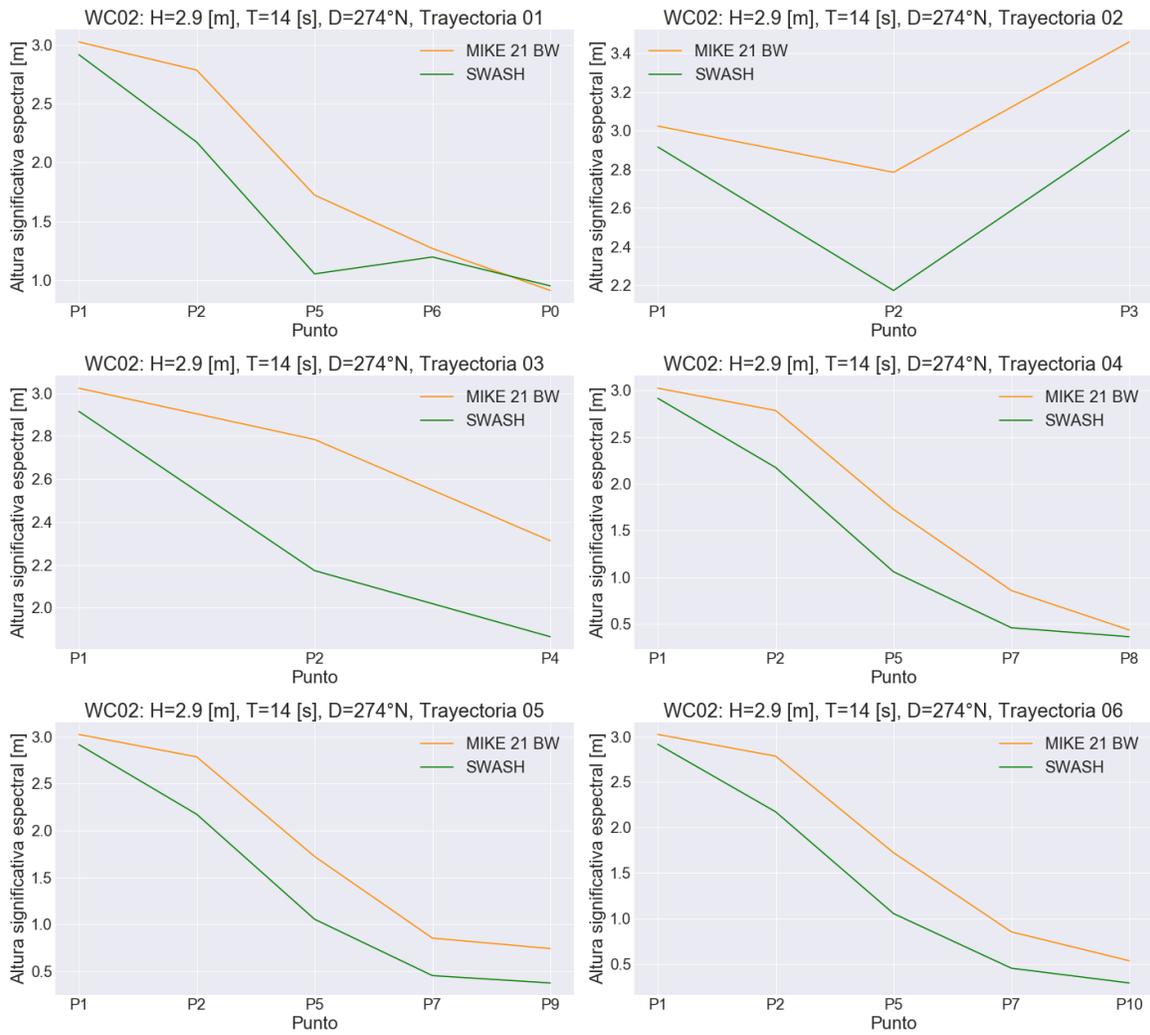


Figura B.2: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 02 (WC02H2.9T14D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3

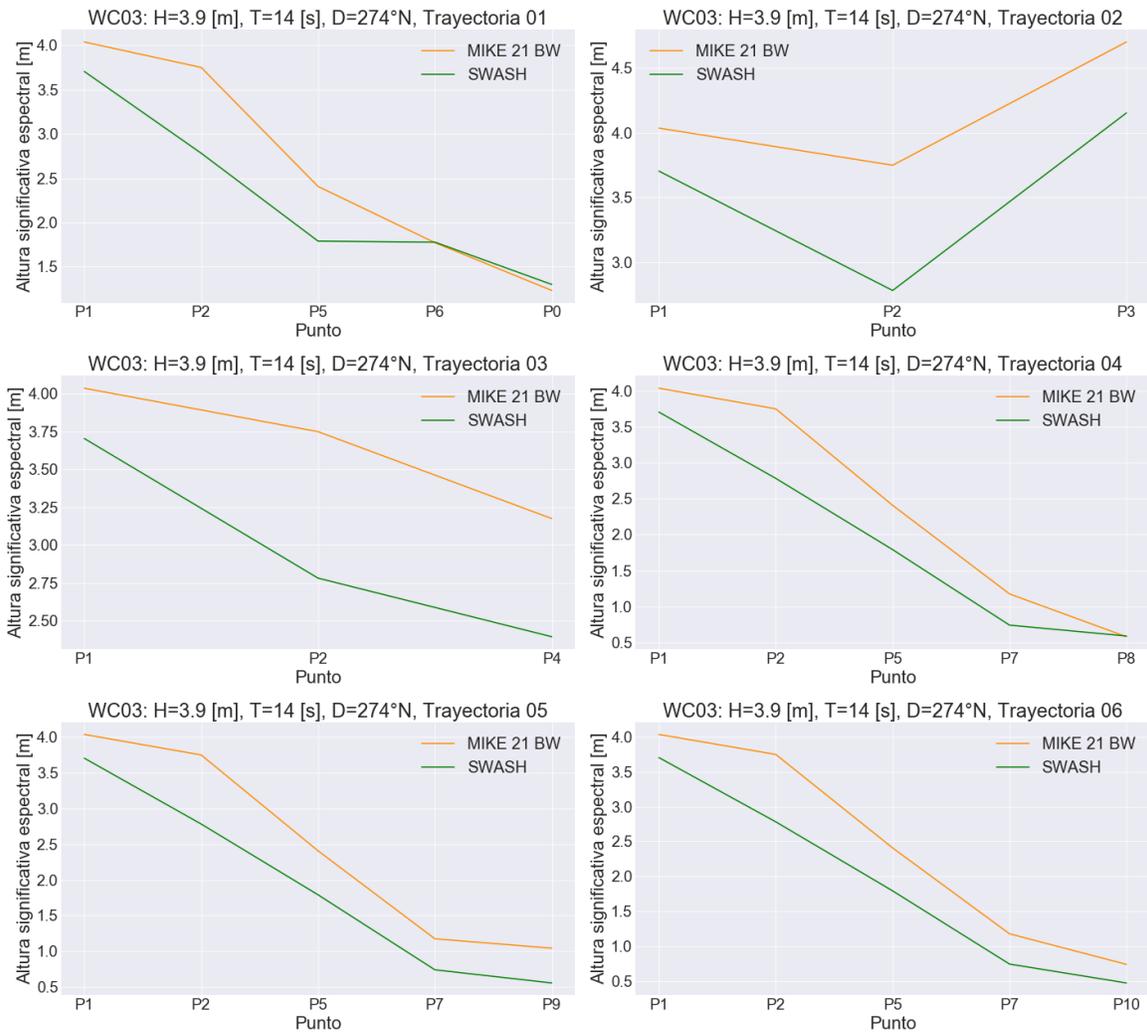


Figura B.3: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 03 (WC03H3.9T14D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3

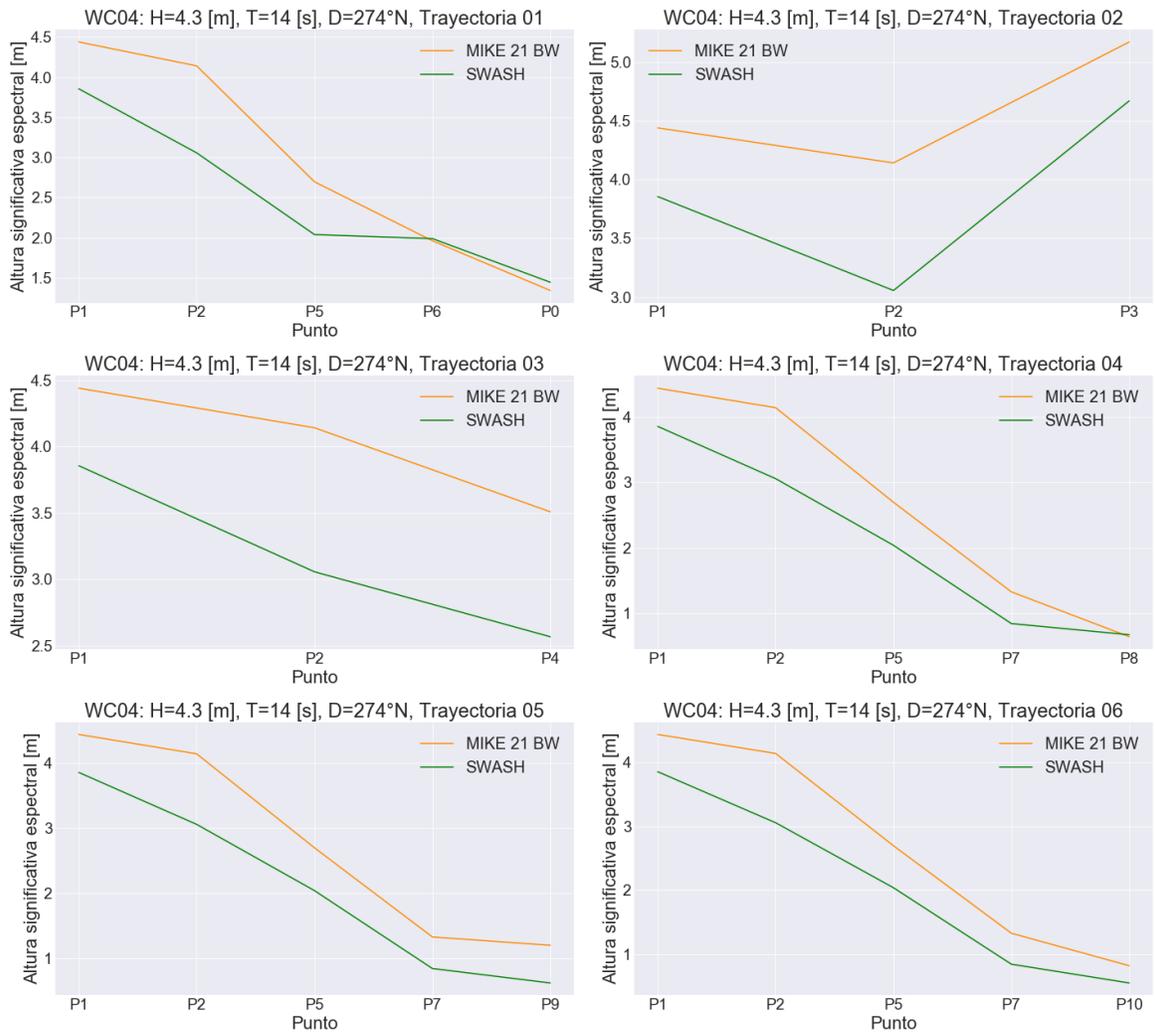


Figura B.4: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 04 (WC04H4.3T14D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3

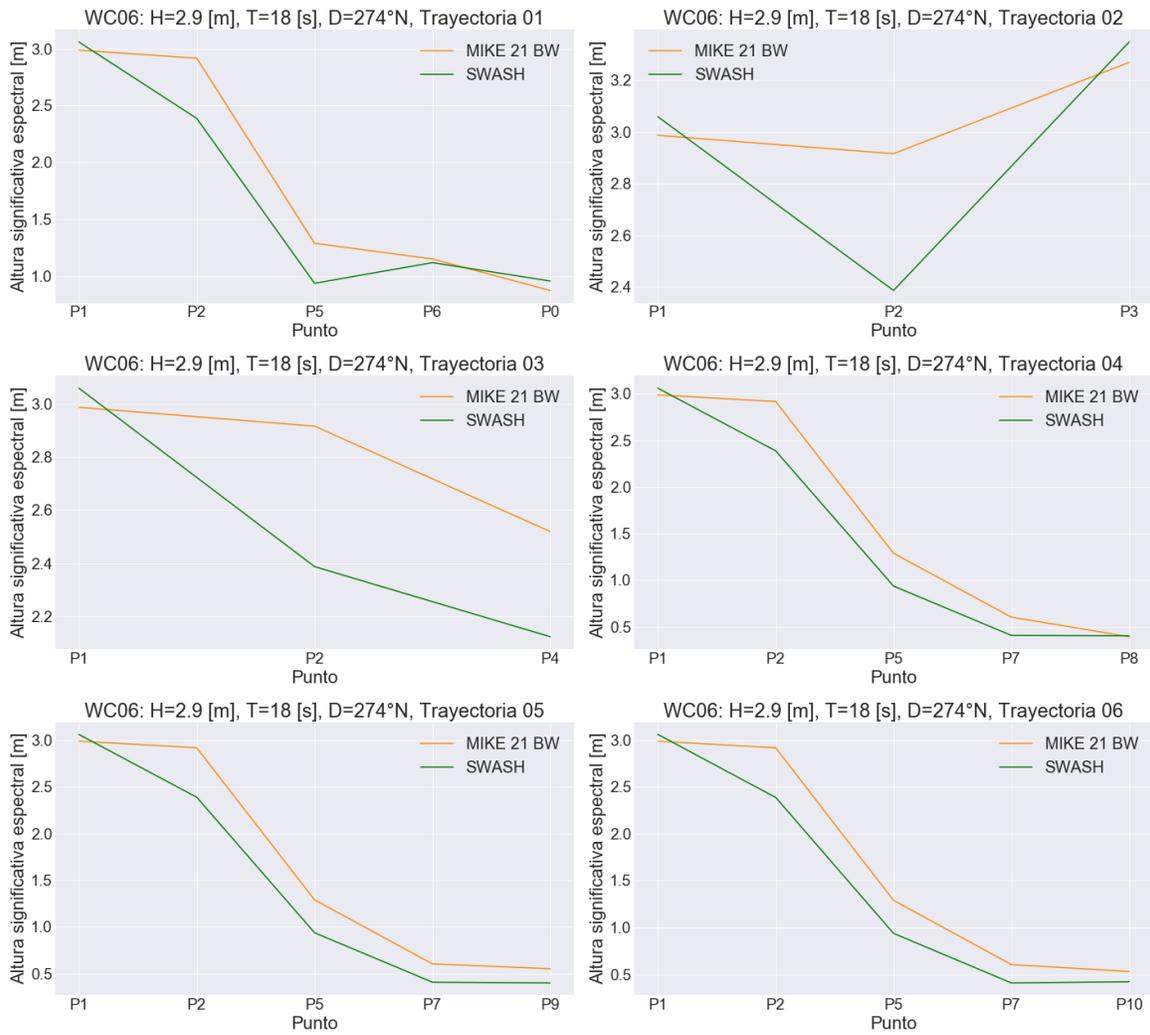


Figura B.5: Resultados de la altura significativa asociadas a la condición de oleaje 06 (WC06H2.9T18D274) a lo largo de las trayectorias definidas en la Figura 3.3

Anexo C

Relación de onda corta fuera del puerto con los sitios de atraque

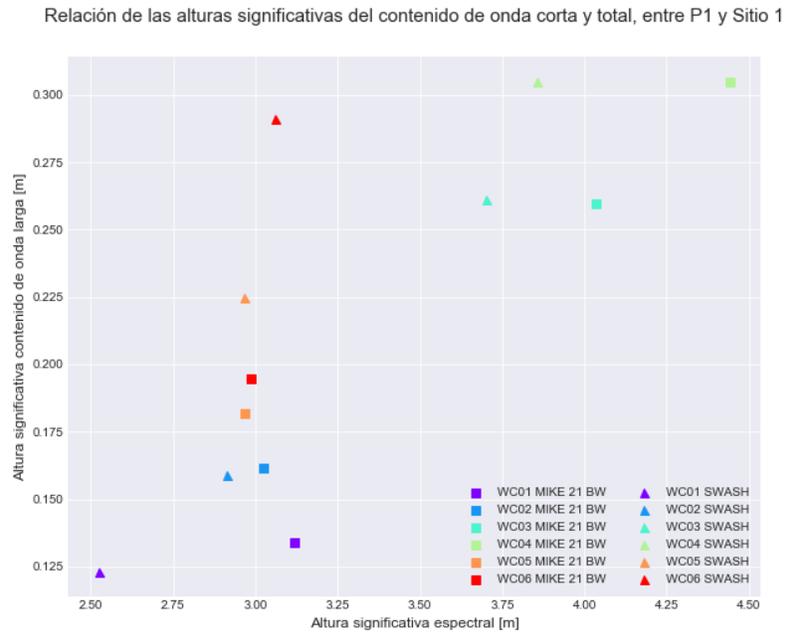


Figura C.1: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 1, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas.

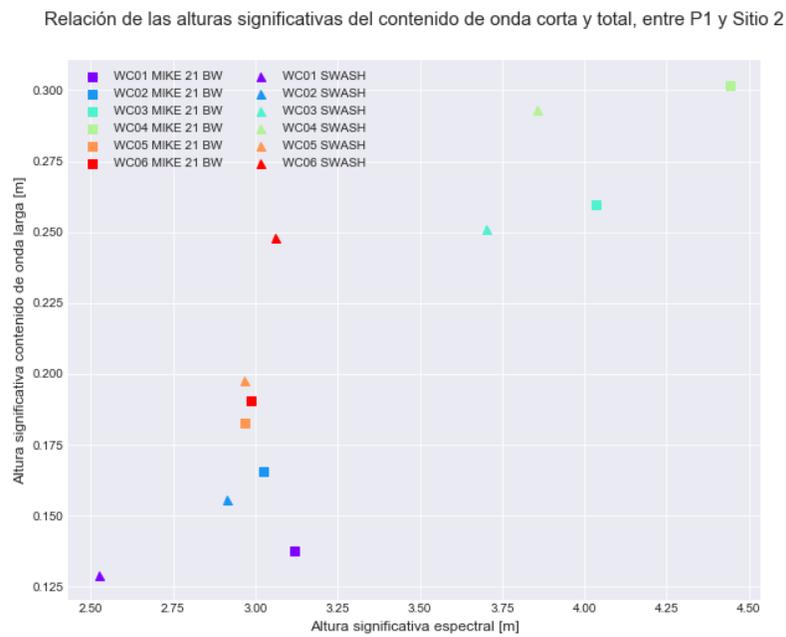


Figura C.2: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 2, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas.

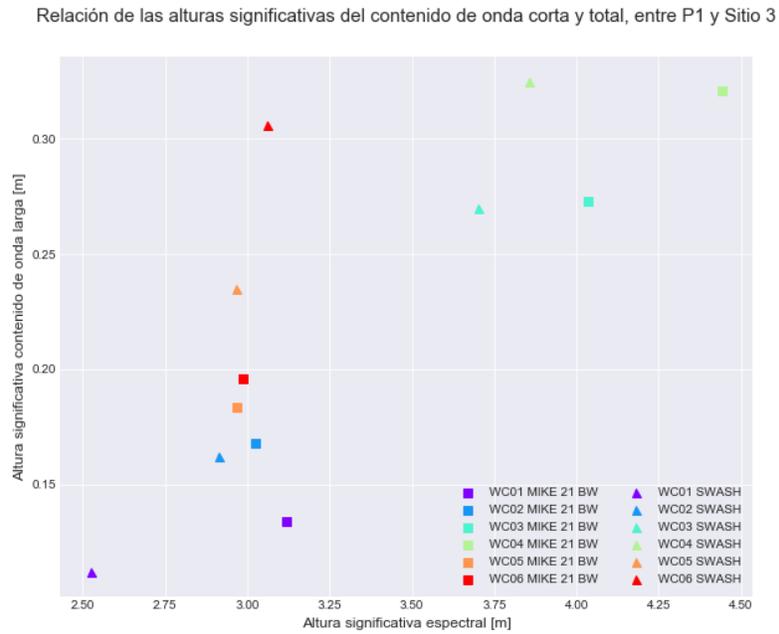


Figura C.3: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 3, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas.

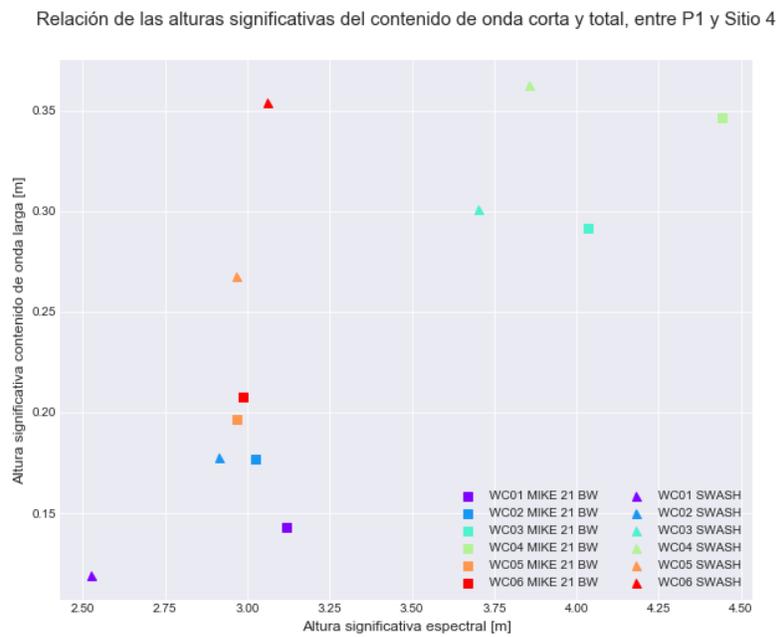


Figura C.4: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 4, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas.

Relación de las alturas significativas del contenido de onda corta y onda larga, entre P1 y Sitio 5

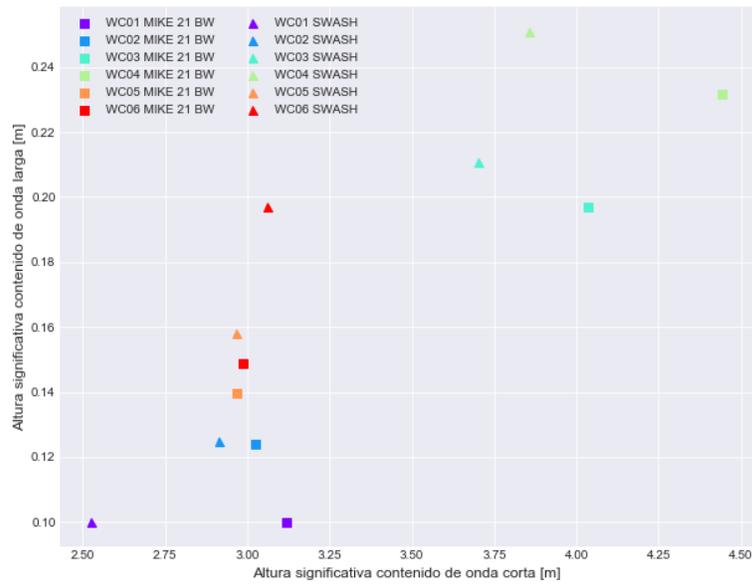


Figura C.5: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 5, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas.

Relación de las alturas significativas del contenido de onda corta y total, entre P1 y Sitio 6

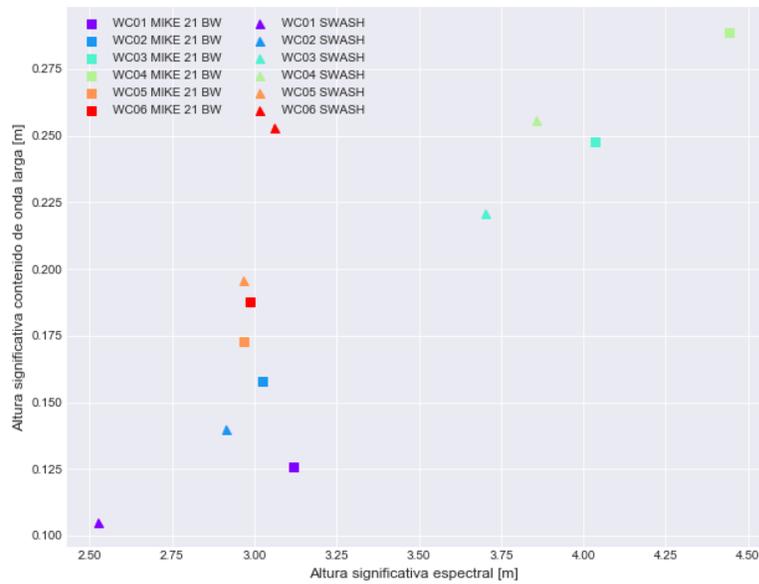


Figura C.6: Relación entre la altura significativa espectral en el punto P1 con la altura significativa espectral promedio asociada al contenido de onda larga del Sitio 6, para cada una de las condiciones de oleaje simuladas.

Anexo D

Modos resonantes de la dársena del Puerto de San Antonio para las condiciones de oleaje modeladas

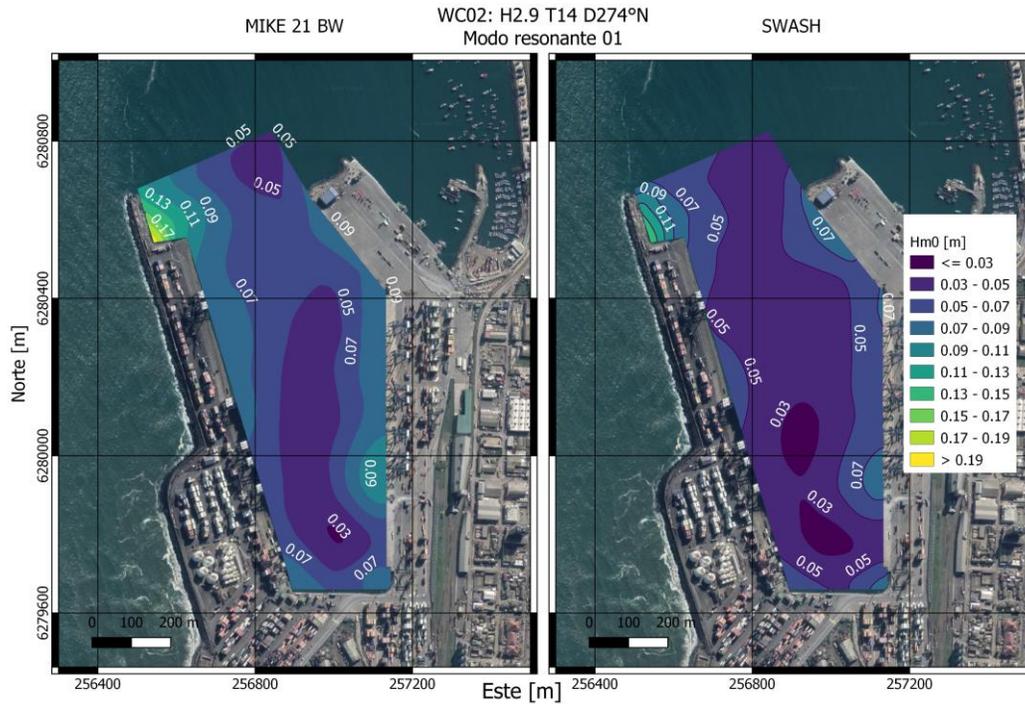


Figura D.1: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

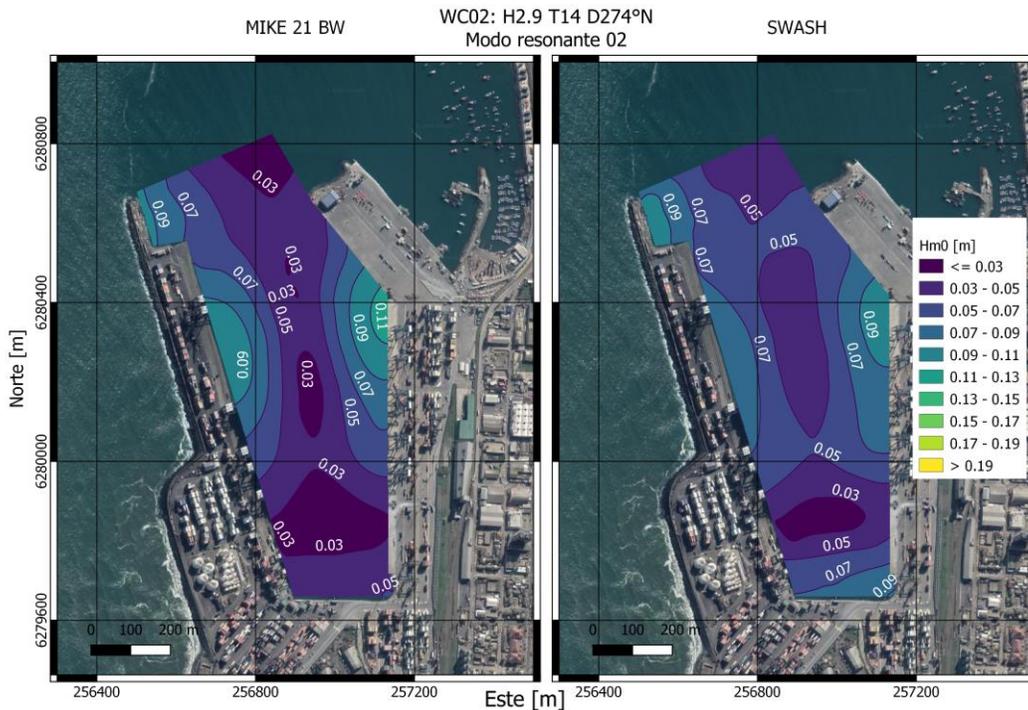


Figura D.2: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

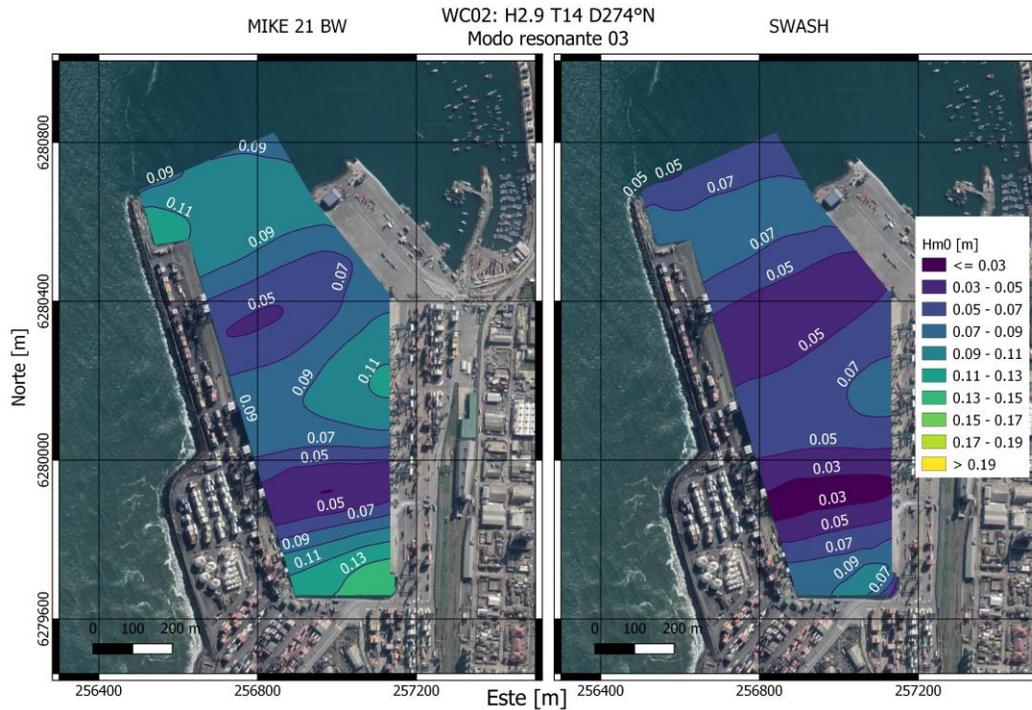


Figura D.3: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

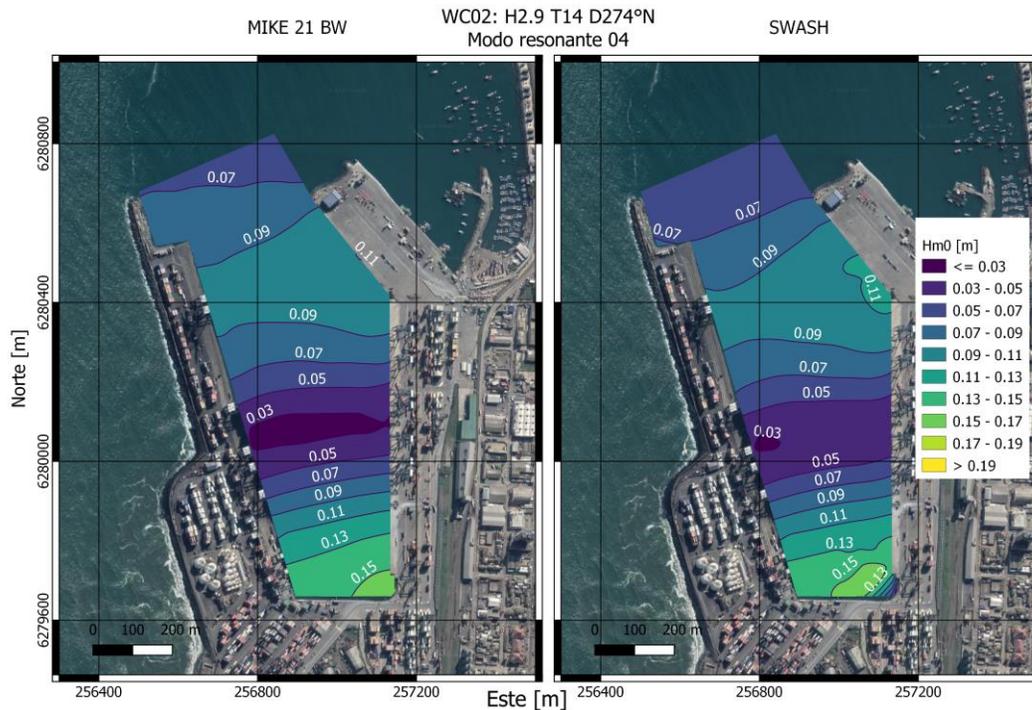


Figura D.4: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

Anexo D

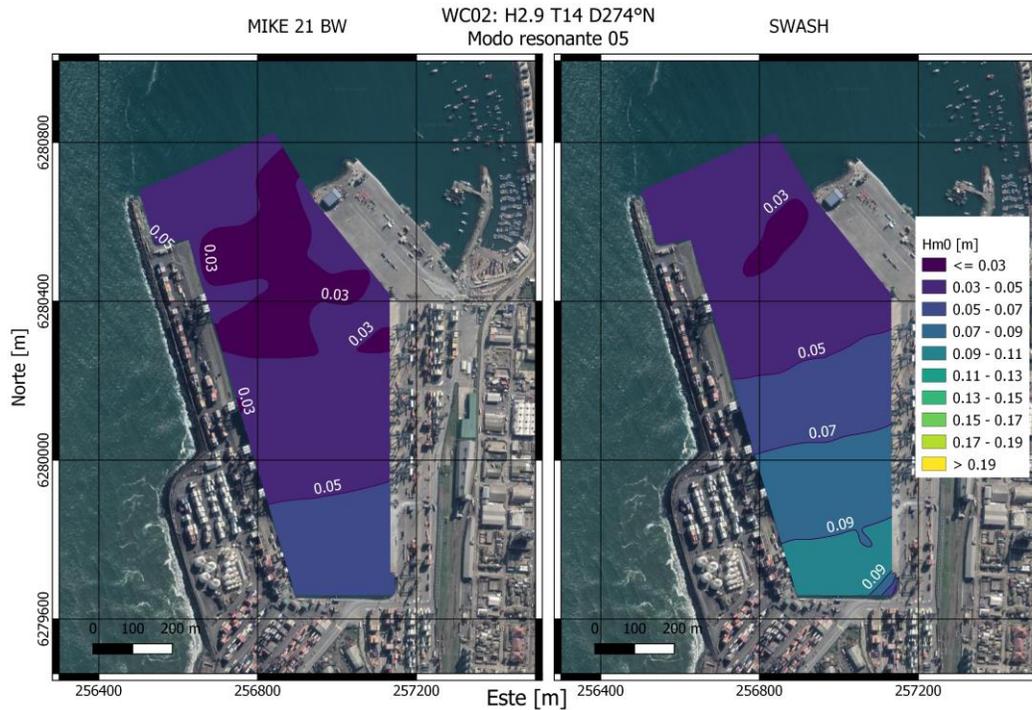


Figura D.5: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 02. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

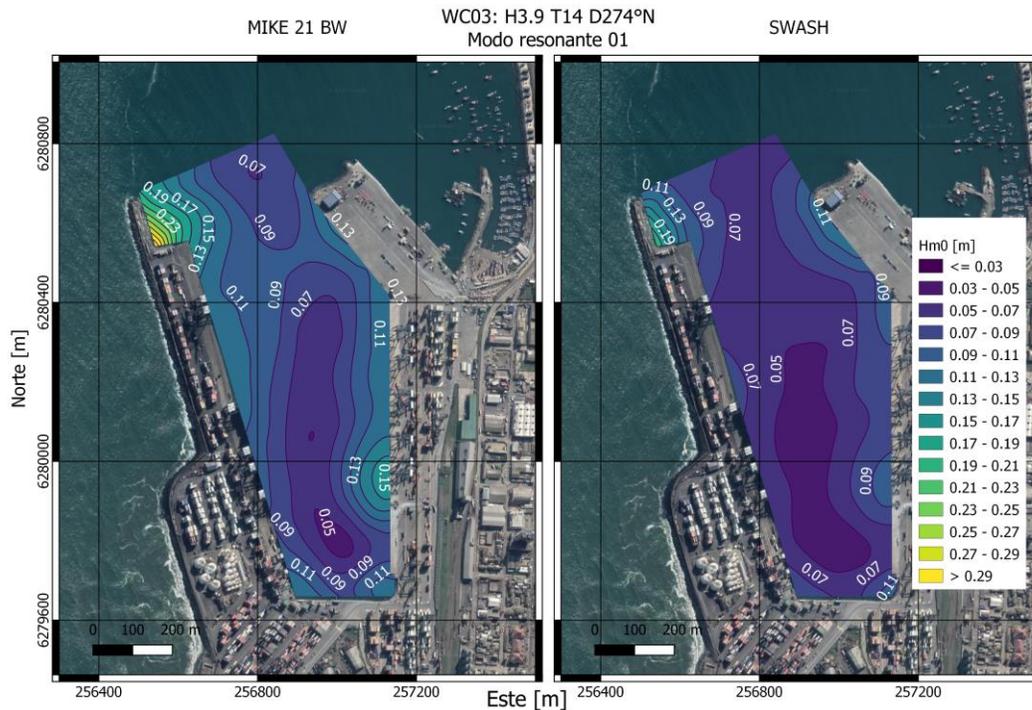


Figura D.6: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

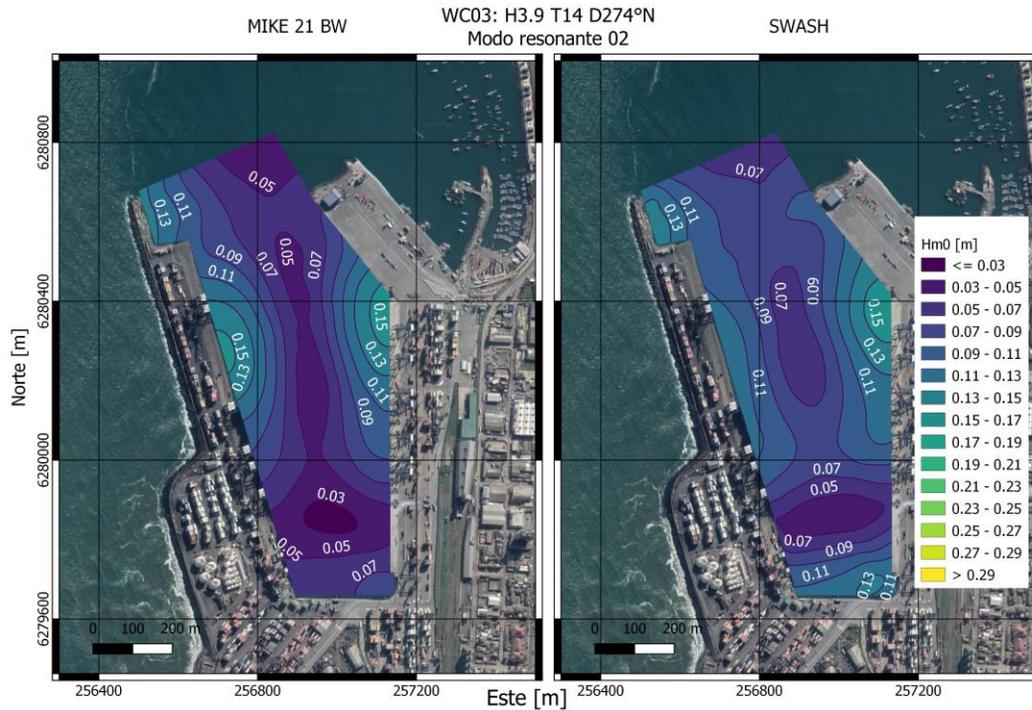


Figura D.7: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

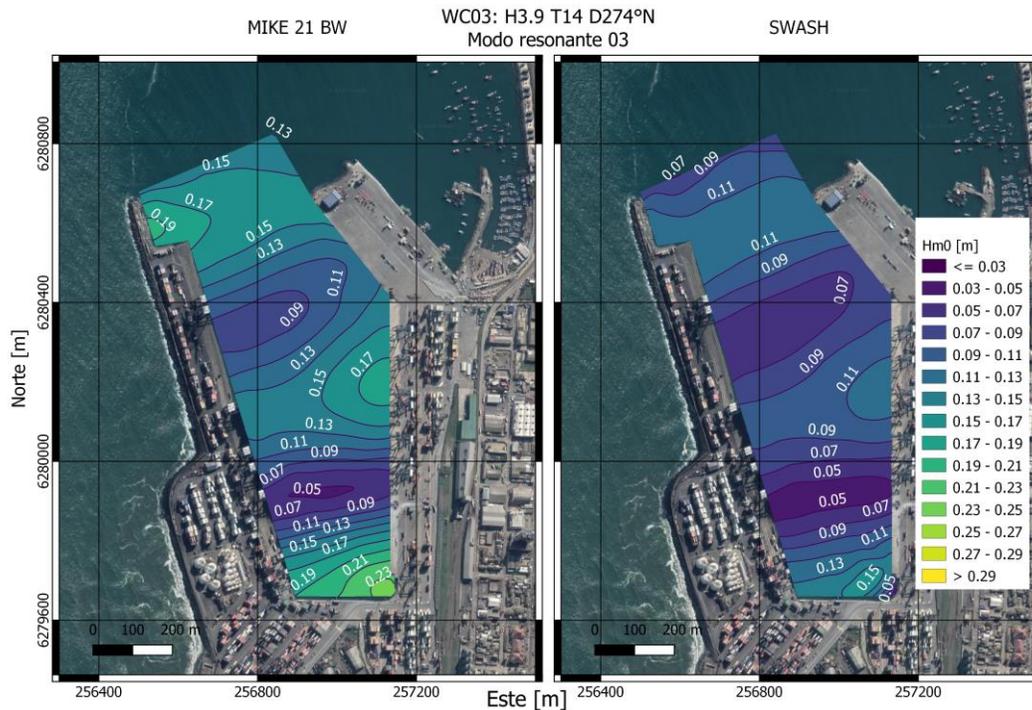


Figura D.8: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

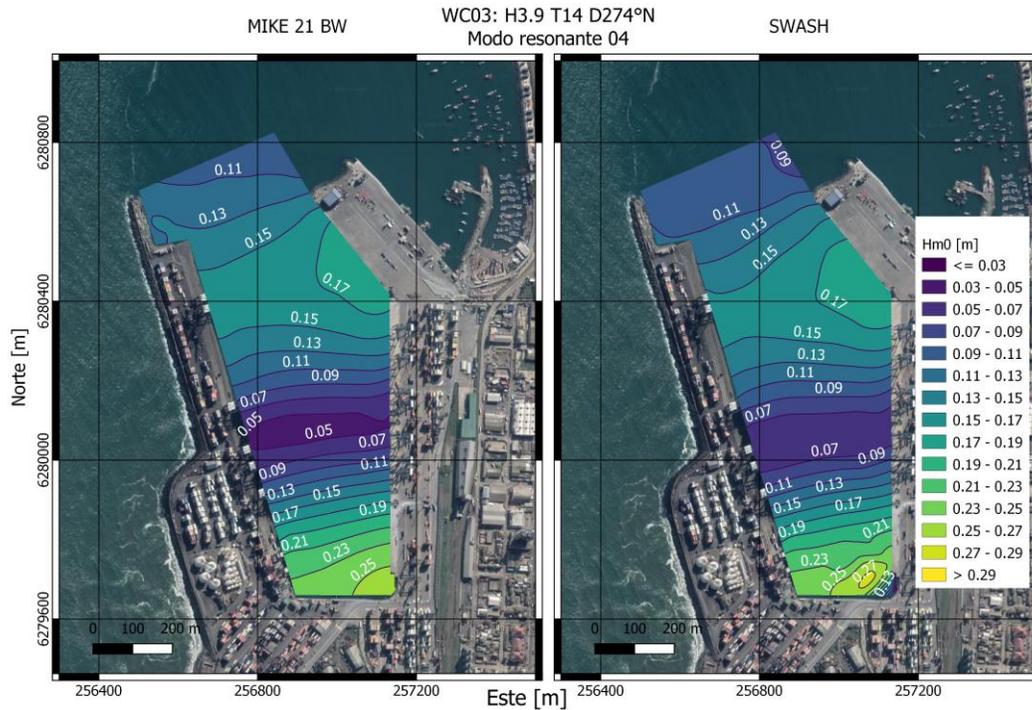


Figura D.9: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

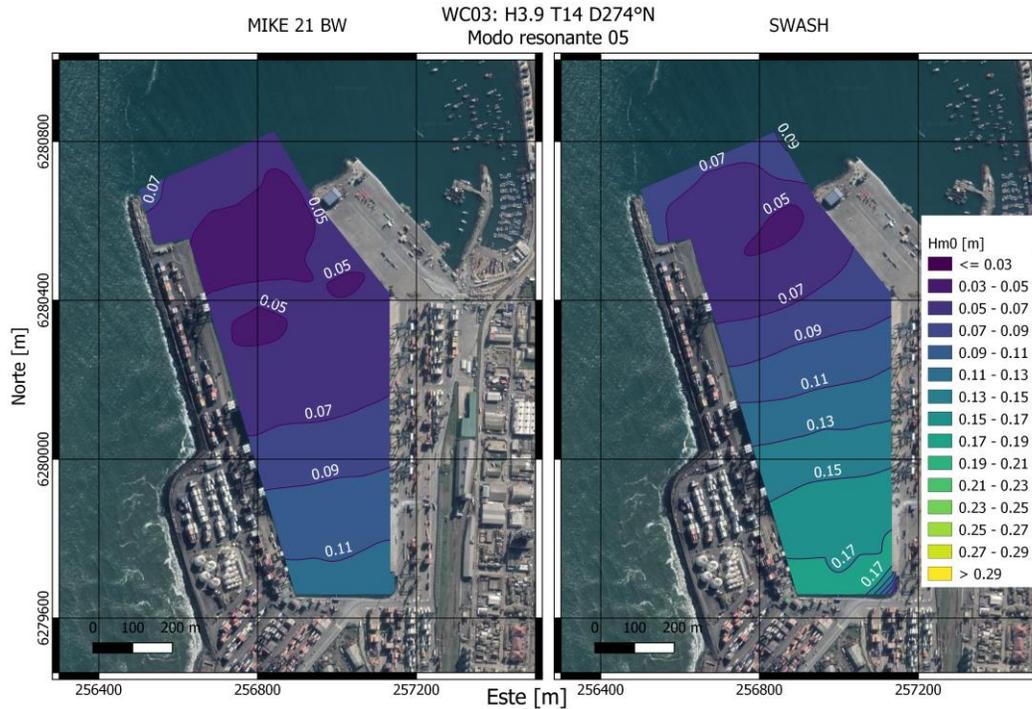


Figura D.10: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 03. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

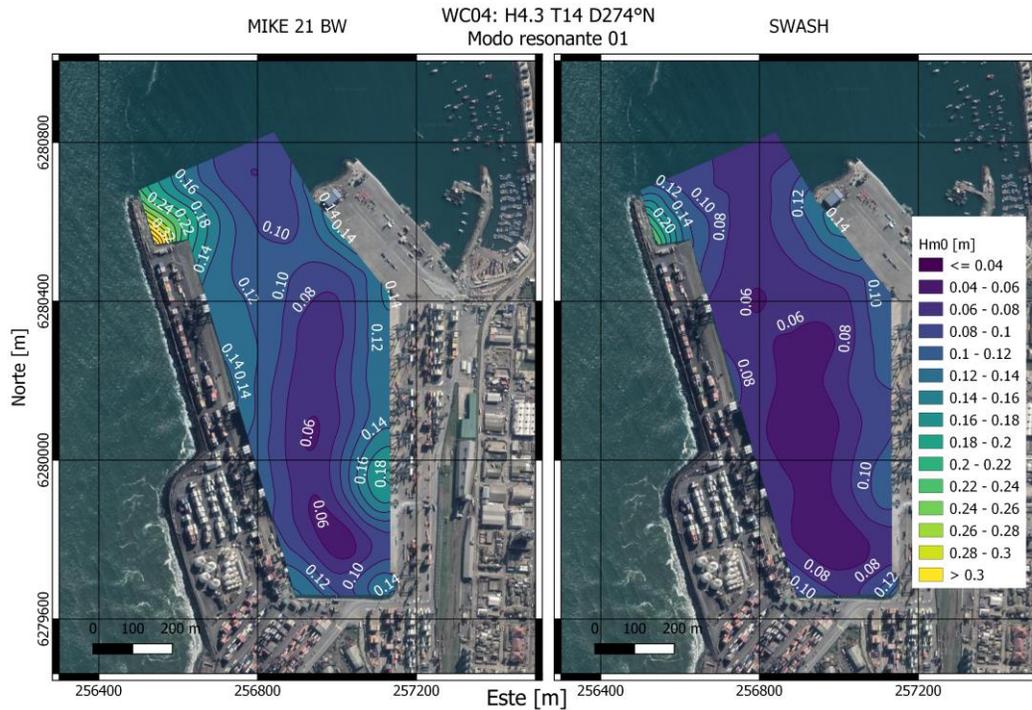


Figura D.11: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

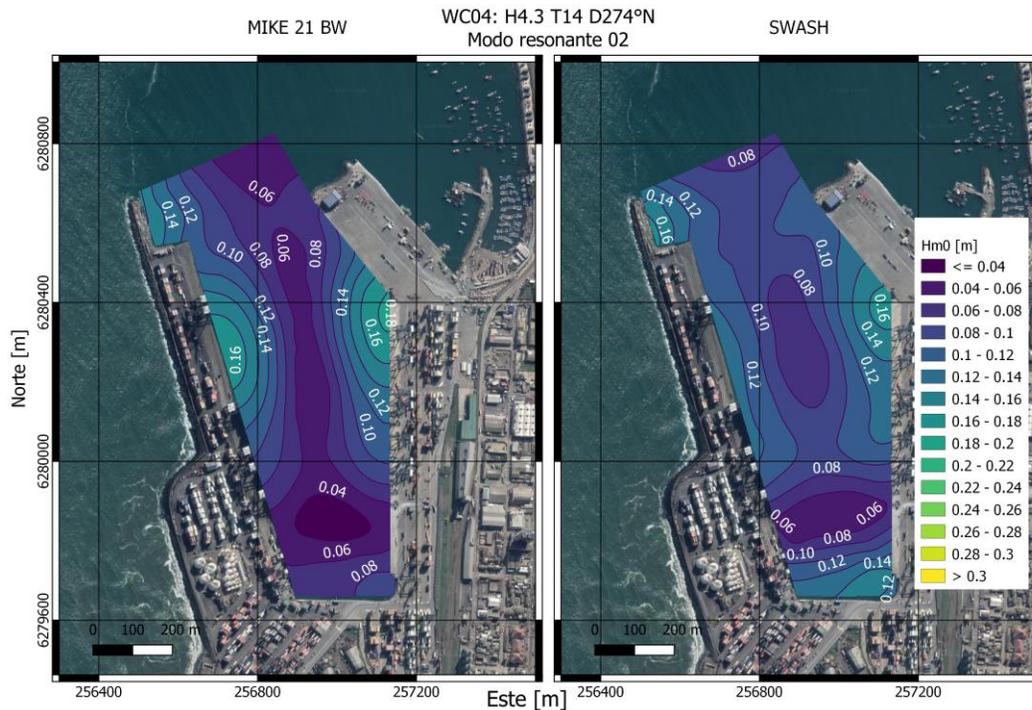


Figura D.12: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

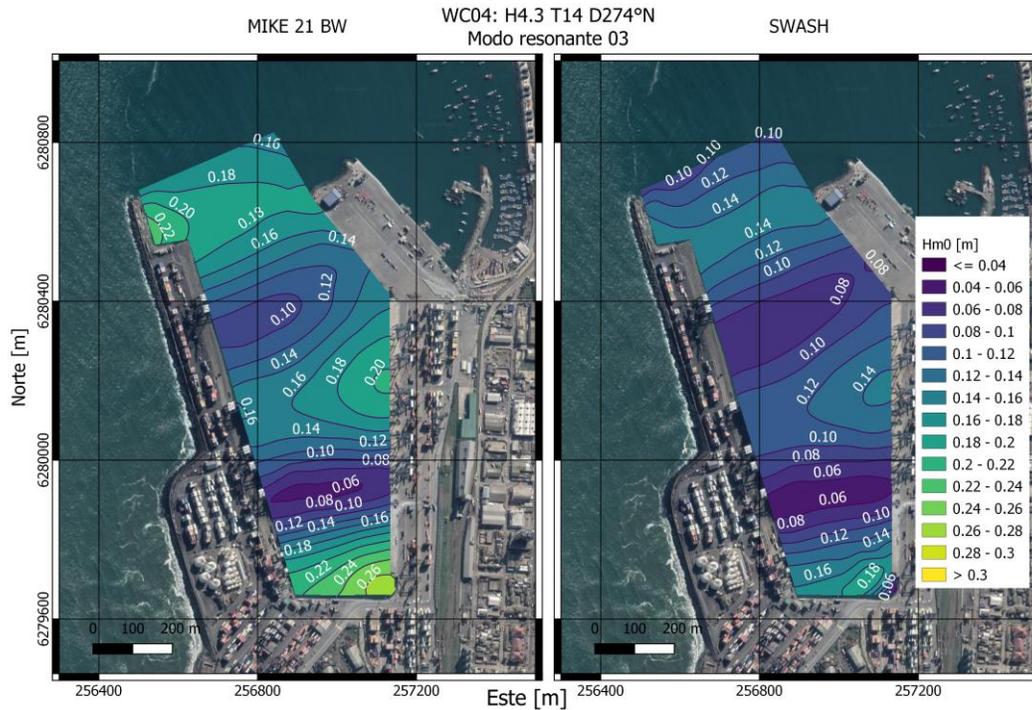


Figura D.13: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

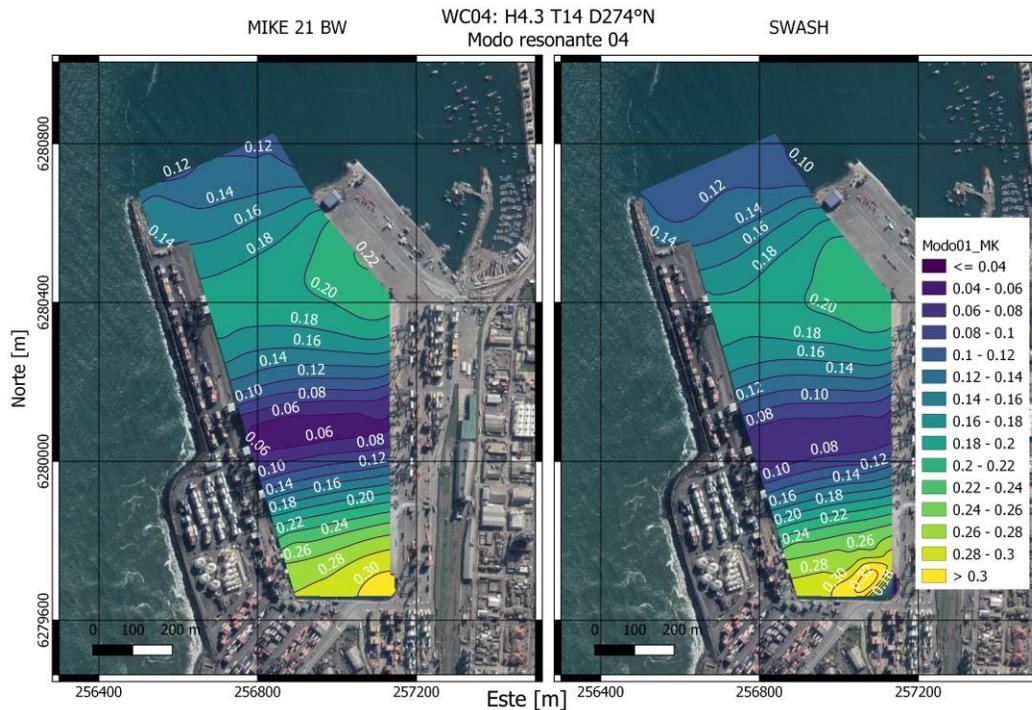


Figura D.14: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

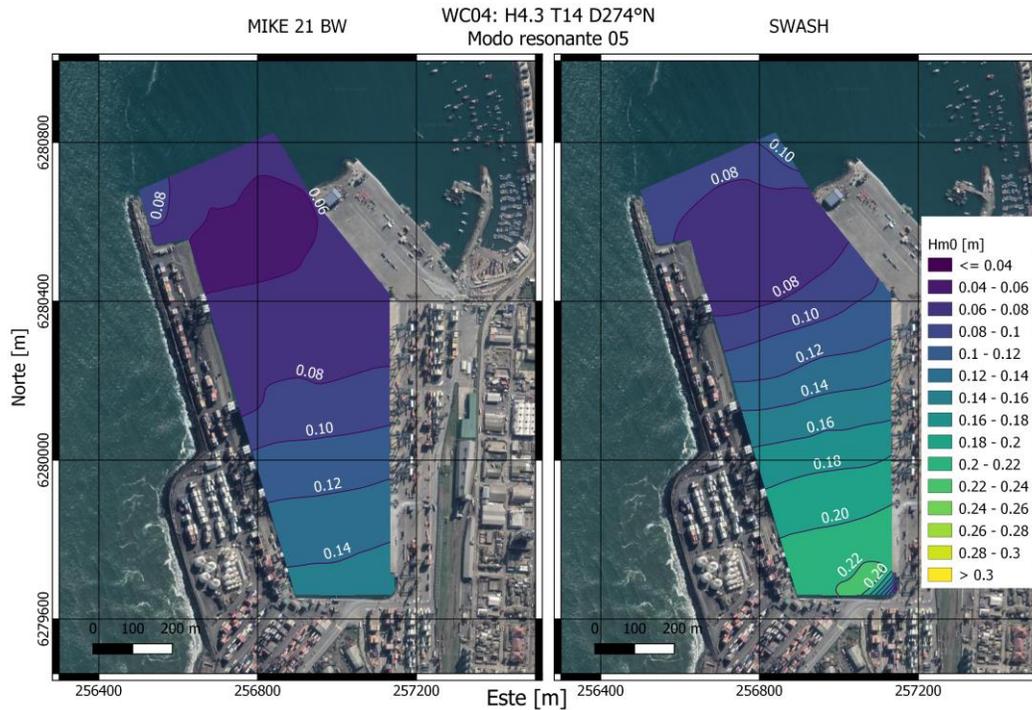


Figura D.15: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 04. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

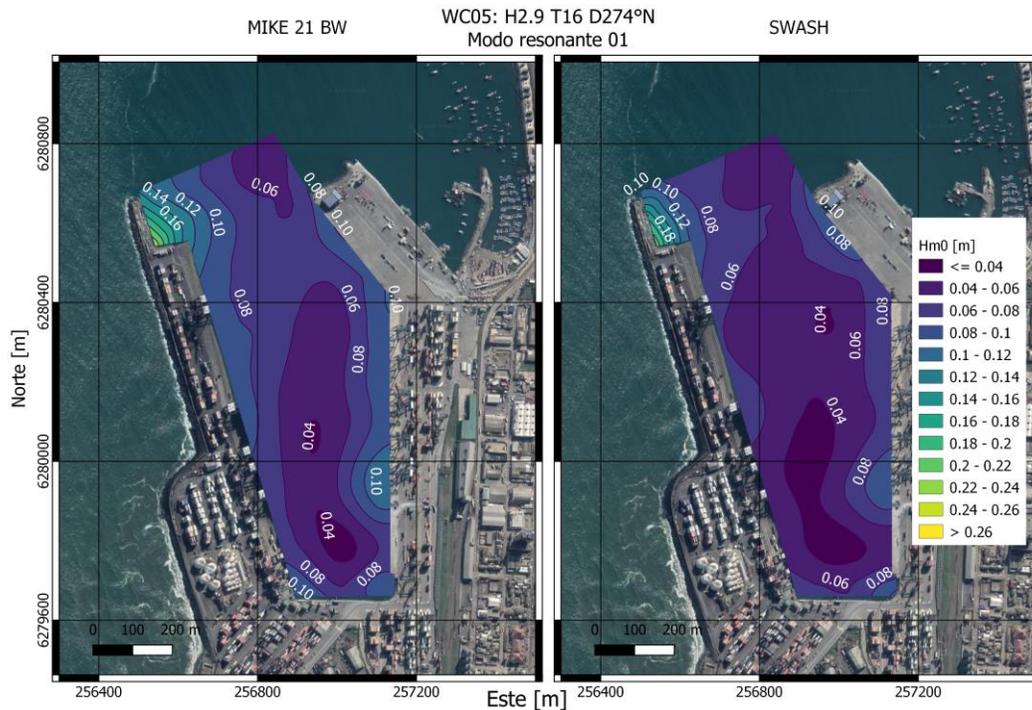


Figura D.16: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

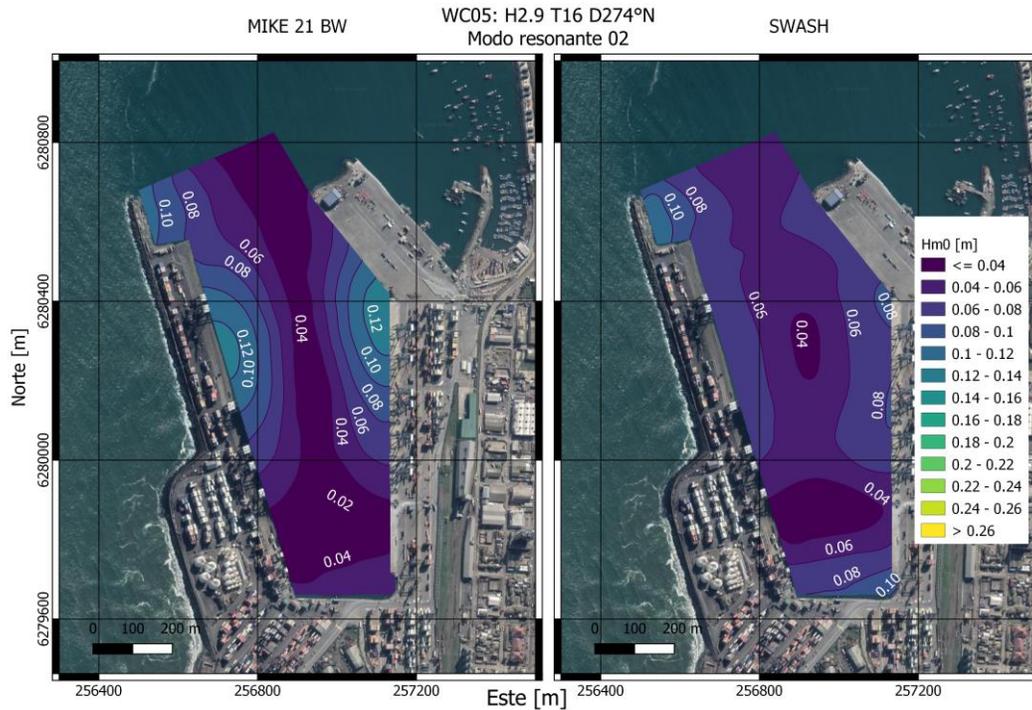


Figura D.17: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

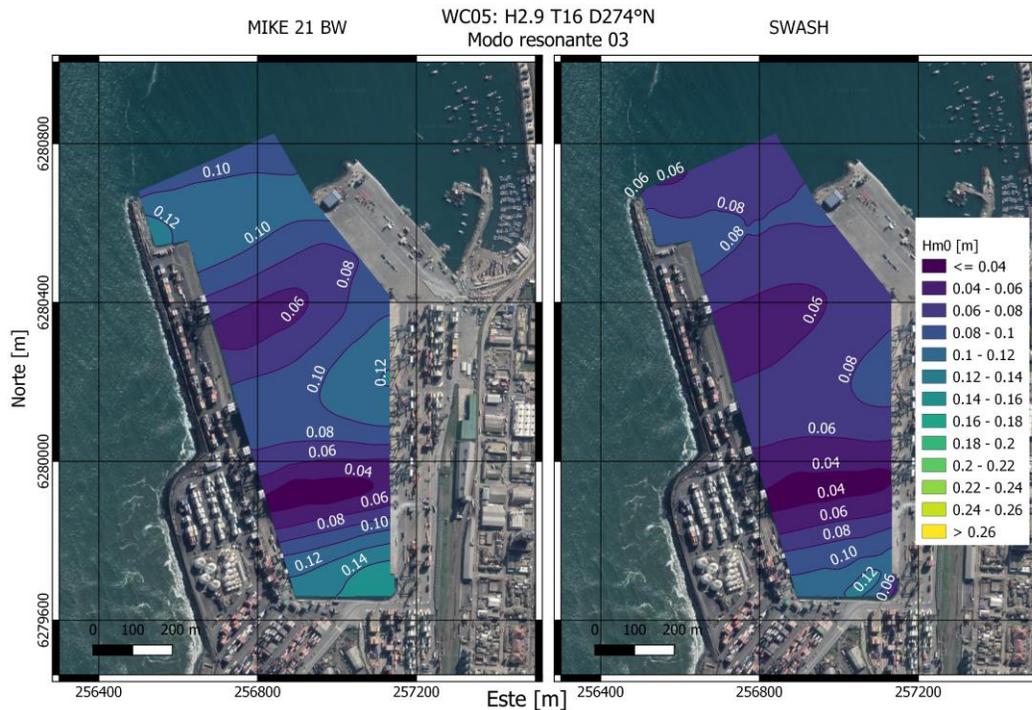


Figura D.18: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

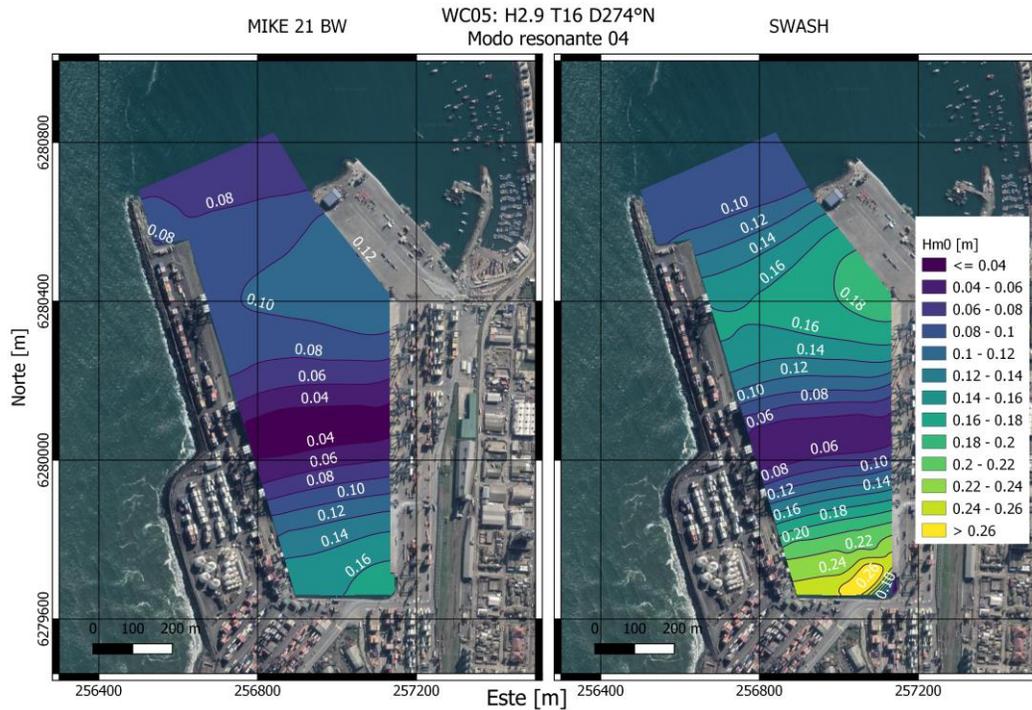


Figura D.19: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

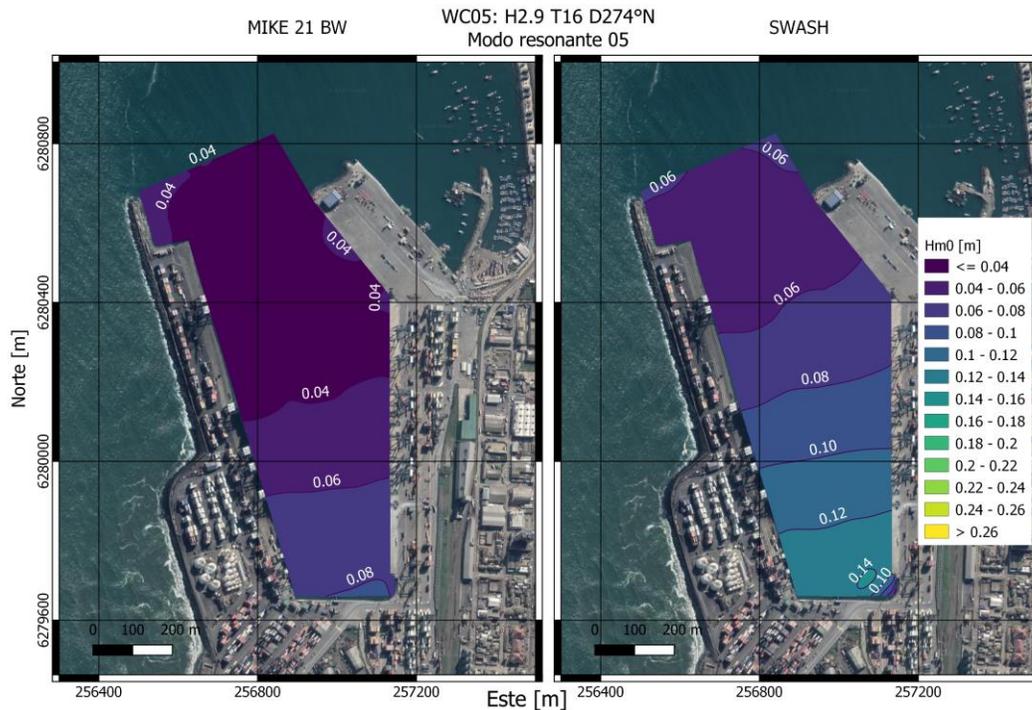


Figura D.20: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 05. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

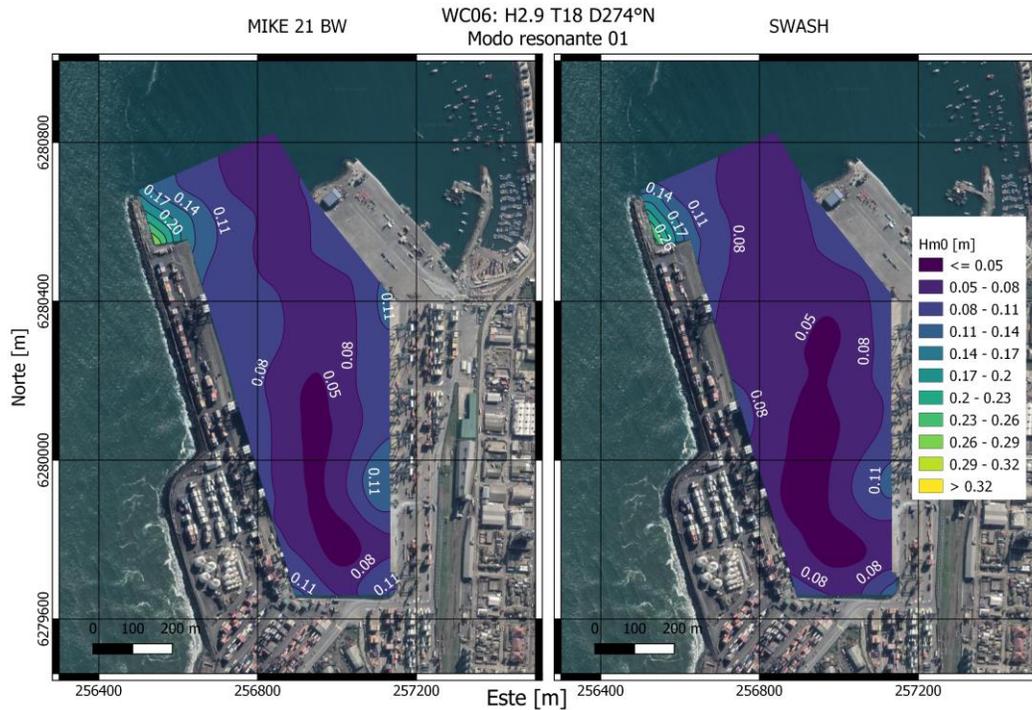


Figura D.21: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del primer modo resonante (periodo, 30s-50s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

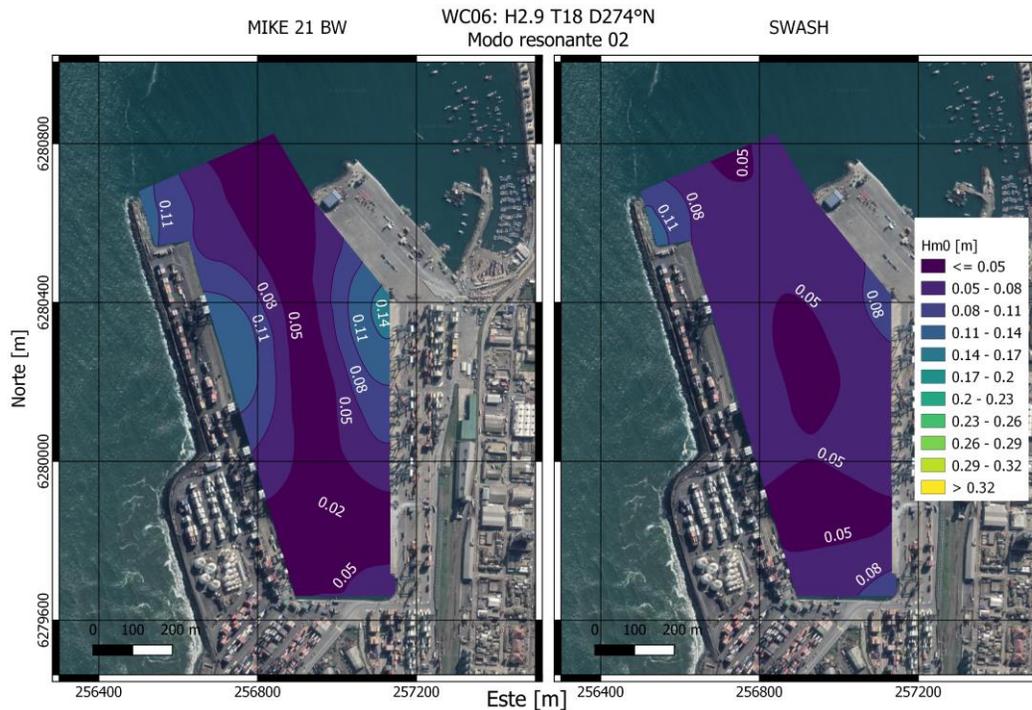


Figura D.22: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del segundo modo resonante (periodo, 50s-64s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

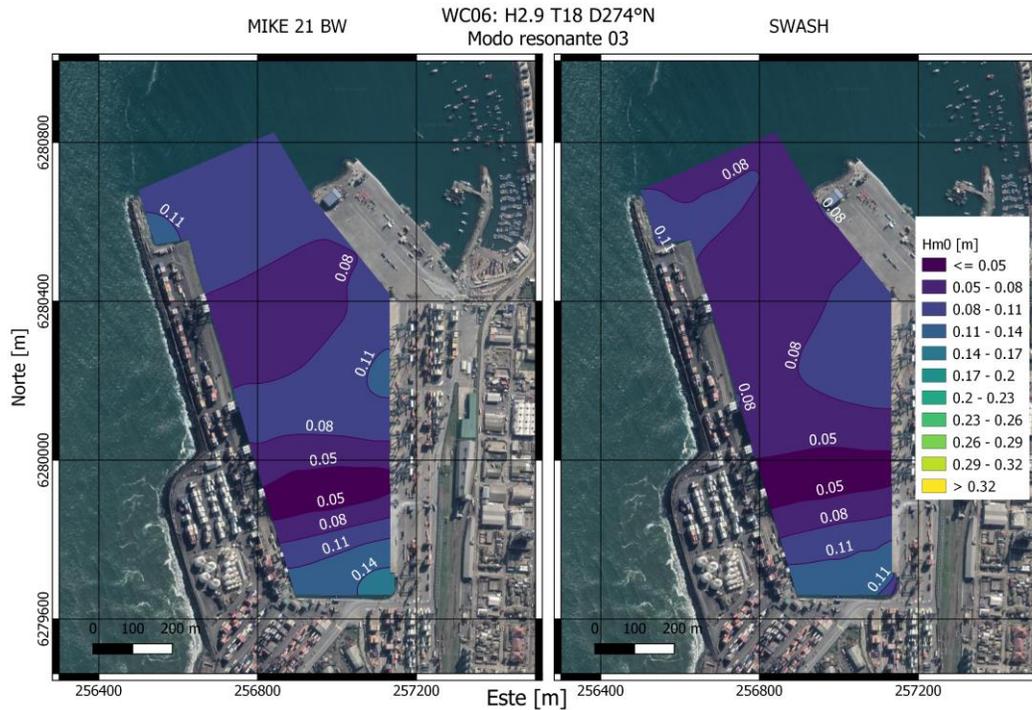


Figura D.23: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del tercer modo resonante (periodo, 64s-102s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

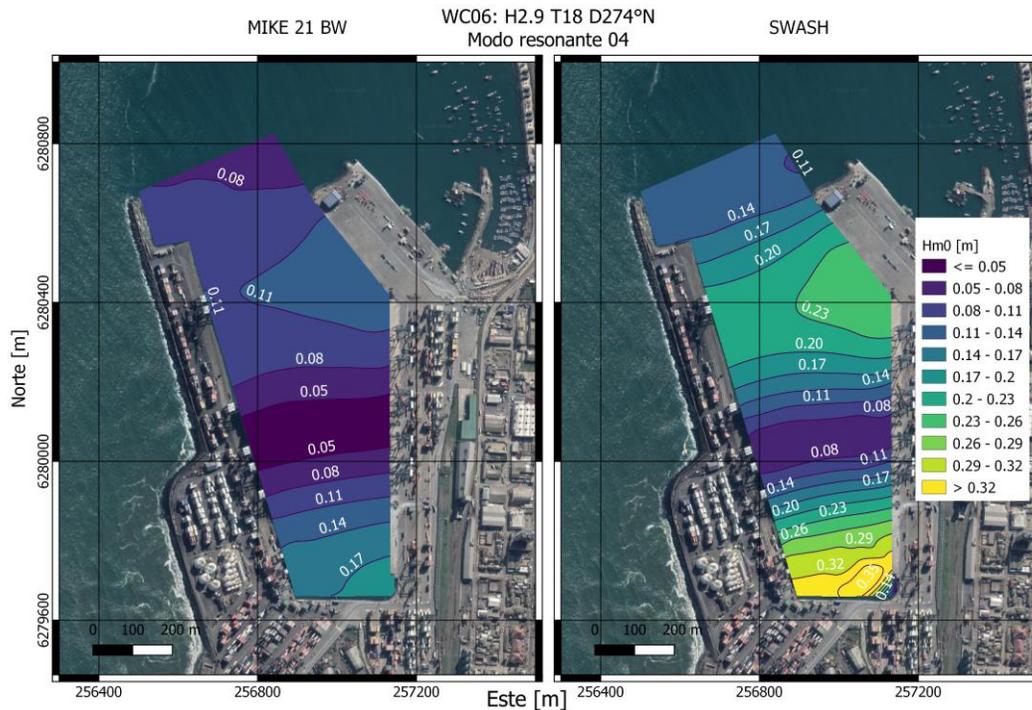


Figura D.24: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del cuarto modo resonante (periodo, 102s-170s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

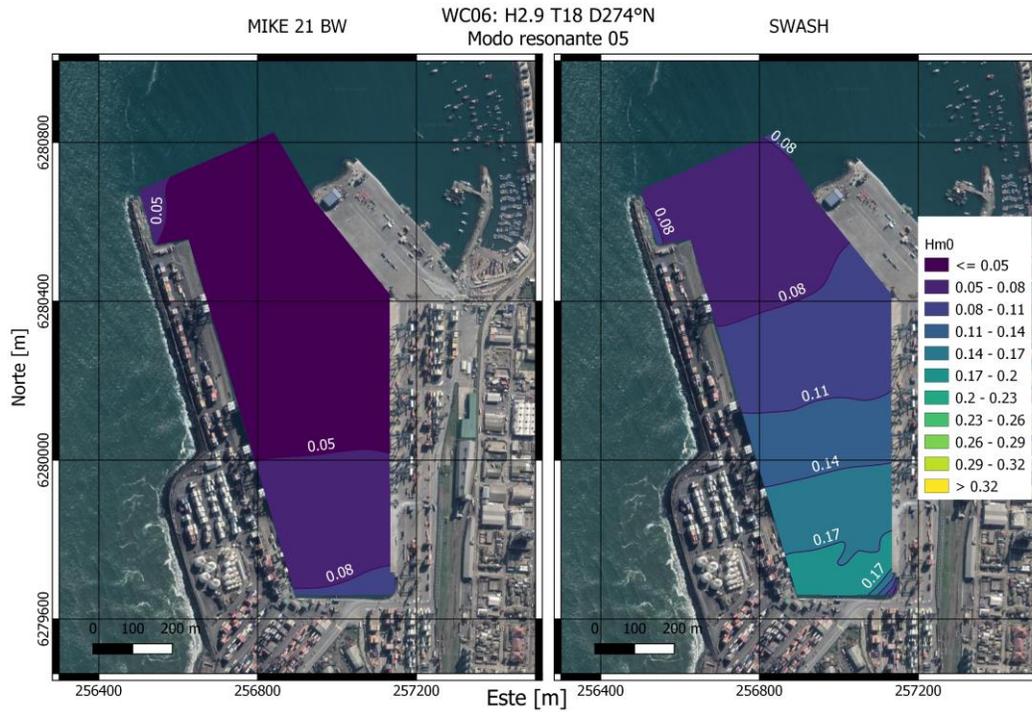


Figura D.25: Mapa de alturas significativas espectrales del contenido del quinto modo resonante (periodo, 170s-300s) dentro de la dársena del Puerto de San Antonio, para el modelado de la condición de oleaje 06. El mapa de la izquierda y derecha corresponden a lo obtenido con los modelos MIKE 21 BW y SWASH respectivamente.

Anexo E

Código de configuración del modelo numérico SWASH

Anexo E

```
$*****HEADING*****
PROJ 'Model_SA' 'M01'
$*****MODEL INPUT*****

SET NOR = 90, DEPMIN = 0.005, RHOWAT = 1025

MODE DYNamic TWODIMENSIONAL

COORDINATES CARTESIAN
$
CGRID REGULAR 0 0 0 4650 9010 465 901

$$$ VERTICAL Layers $$$
VERT 4

$$$ INPUT BATHYMETRY LAYER $$$
INPGRID BOTTOM REGULAR 0 0 0 464 900 10 10 EXC = -99
READ BOT 1 'Bathy_SA.bot' IDLA = 1 FREE

$$$ INPUT FRICTION LAYER $$$
INPGRID FRiction REGULAR 0 0 0 464 900 10 10
READINP FRiction 1 'Friction_SA.fri' IDLA = 1 FREE

$$$ INPUT POROSITY LAYER $$$
INPGRID PORosity REGULAR 0 0 0 464 900 10 10
READINP PORosity 1 'Porosity_SA.n' IDLA = 1 FREE

INIT ZERO

$$$ BOUNDARY AND INITIAL CONDITIONS $$$

BOUN SHAPE JON 2.0 SIG PEAK DSPR DEGR
BOU SEGM IJ 1 201 1 701 BTYP WEAK CON SPECT 2.9 18 11

$$$ SETTING OF SPONGE LAYER $$$
SPON South 2000
SPON North 2000

$$$ ACTIVATION OF FRICTION LAYER $$$
FRIC MANN 0.3

$$$ ACTIVATION OF POROSITY LAYER $$$
PORO 1.5

$$$ SETTING OF NUMERIC SOLUTION $$$
```

Anexo E

NONHYDrostatic

\$TIMEI METH 0.1 0.8

\$\$\$ OUTPUT \$\$\$

FRame 'BOTTGRID' 0 0 0 4650 9010 465 900

POINts 'Dar' FILE 'Dar_points.pnt'

POINts 'BPA' FILE 'BPA.pnt'

POINts 'Out' FILE 'Out_points.pnt'

BLOck 'BOTTGRID' NOHEAD 'HM0_WC_XX.mat' LAY-OUT 3 WATL OUTPUT 000000.000 30 SEC

TABLE 'Dar' NOHEAD 'WC06_Dar.tbl' TSEC XP YP WATL OUTPUT 000000.000 2 SEC

TABLE 'BPA' NOHEAD 'WC06_BPA.tbl' WATL OUTPUT 000000.000 2 SEC

TABLE 'Out' NOHEAD 'WC06_Out.tbl' TSEC XP YP WATL OUTPUT 000000.000 2 SEC

COMPUte 000000.000 0.2 SEC 030000.000

STOP