Ingeniería Civil Oceánica

Universidad de Valparaíso

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

José Manuel Gómez Rubilar
Profesor guía: Patricio Winckler
Santiago 2020

INTRODUCCIÓN

Chile es un país que cuenta con 6435 Km (Gobierno de Chile, 2020).

Para el correcto funcionamiento de los puertos y las caletas, es necesario que se cuente con las condiciones de abrigo óptimas para una buena operatividad.

Fotografía del puerto de San Antonio
Fuente: http://www.empresaoceano.cl/

OBJETIVOS

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

Los objetivos específicos son:

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

ALCANCES Y LIMITACIONES

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

Las limitaciones para el caso real fueron:

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

FUNDAMENTO TEÓRICO

TEORÍA NO LINEAL DEL OLEAJE O ECUACIONES DE ONDA LARGA

Estas ecuaciones se pueden utilizar específicamente para estudiar la propagación de ondas en aguas someras, que es la materia de estudio. Las teorías de ondas largas se dividen principalmente en dos aproximaciones.

- Las **Ecuaciones no lineales de aguas someras** o Nonlinear Shallow Water Equations en inglés (NSWE), corresponden a una versión simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes y reducen el dominio de tres dimensiones $X = (x, y, z)$ a dos $X = (x, y)$ (Winckler, 2017).

- Las **Ecuaciones de tipo Boussinesq** son una aproximación para ondas largas débilmente dispersivas. Las ecuaciones de Boussinesq son integradas en la profundidad y se basan en el supuesto de que los términos no lineales y dispersivos son mucho menores que los inerciales (Peregrine, 1967).

SWASH, MODELO DE PROPAGACIÓN NSWE

Las ecuaciones de gobierno a continuación se introducen en términos de notación cartesiana (Zijlema, Stelling, & Smit, 2011) .

Estas ecuaciones están dadas por:

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

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

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

CELERIS, MODELO DE PROPAGACIÓN BOUSSINESQ

Estas ecuaciones son potentes para el estudio de la dinámica costera, incluidos los efectos no lineales y dispersivos.

Estas ecuaciones para flujos 2DH se presentan a continuación en su forma conservativa (Tavakkol & Lynett, 2017).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0$$

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

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

CELERIS, MODELO DE PROPAGACIÓN BOUSSINESQ

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

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

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

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

METODOLOGÍA

Para realizar una comparación en distintas condiciones, se realizaron modelaciones de tres casos distintos con ambos modelos.

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

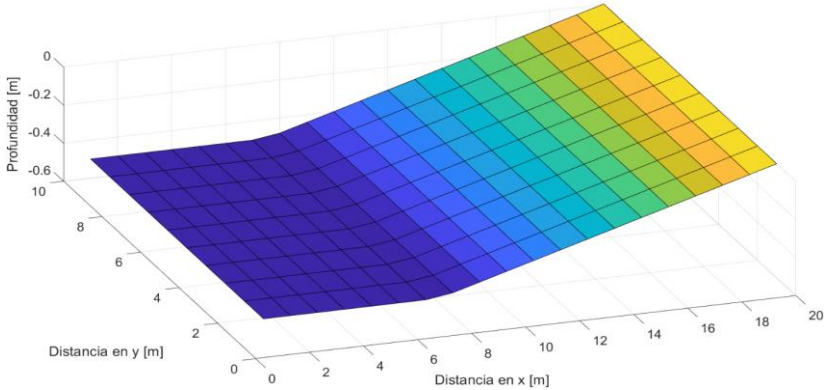
METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

La primera modelación siguió el experimento realizado por Lynett et al. (2002), el cual se basa en el experimento desarrollado por Madsen et al. (1997), por ello se replicó exactamente la misma batimetría de esos experimentos.

Las características de la batimetría fueron.

- Profundidad del canal de 0.5 [m].
- Pendiente de 0.04 (4%)
- Largo del canal 20 [m].
- Ancho del canal 10 [m].
- Como extensión del experimento también se utilizaron pendientes de 0.13 y 0.26.



Batimetría ideal utilizada, pendiente 0.04
Fuente: Elaboración propia en base a Lynett et al. (2002)

METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

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

Se utilizaron las siguientes condiciones de oleaje:

- Un tren de olas con altura de 0.006 [m] (6 [mm] oleaje regular).
- Periodo de 10 [s].
- Oleaje incidente con dirección Oeste.
- Un tamaño de malla de 0.045 [m] (4.5 [cm]).
- Un paso de tiempo 0.01 [s].
- Sin fricción de fondo.

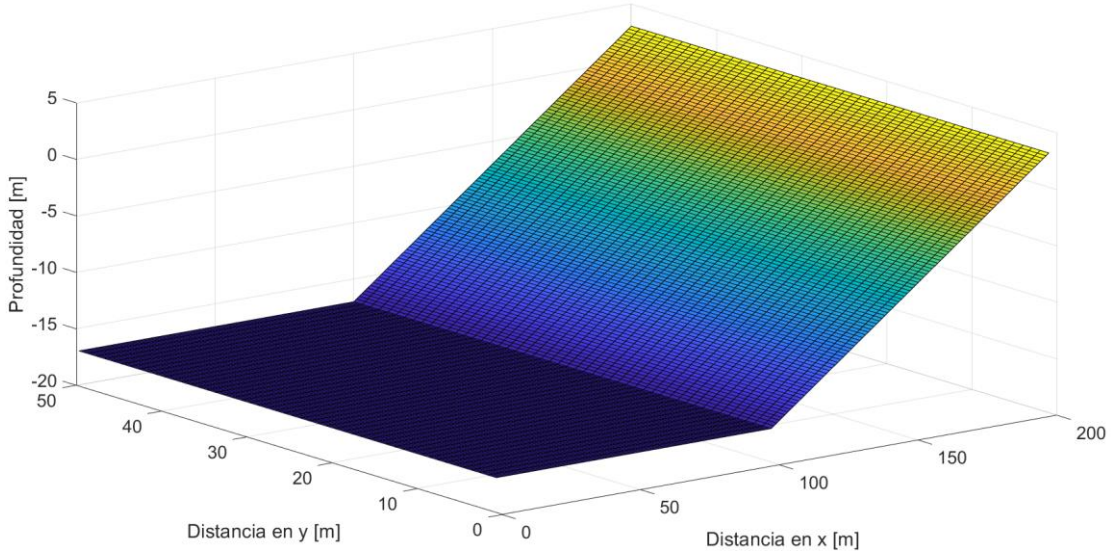
METODOLOGÍA

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

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

Las características de la batimetría fueron.

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



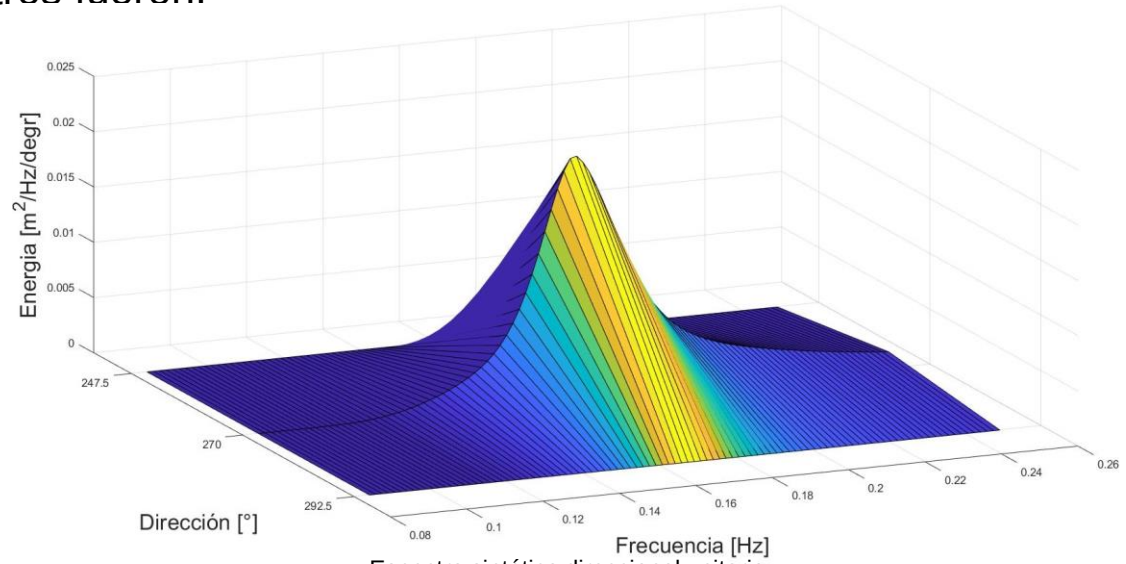
Batimetría ideal con pendiente del 20%
Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

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

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

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



Espectro sintético direccional unitario
Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

ASPECTOS GENERALES

- Para la modelación del Puerto de San Antonio la batimetría real fue obtenida por medio de las cartas náuticas digitales del SHOA, y corregidas por medio de un plano del puerto de San Antonio proporcionado por la Empresa Portuaria San Antonio (EPSA).
- Los datos de oleaje propagados desde aguas profundas hasta el nodo donde se ubica el ADCP fueron proporcionados por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Valparaíso.
- Los datos in situ del ADCP junto con los registros del sitio 9, fueron entregados por EPSA,
- La modelación con SWASH fue finalmente realizada en el súper computador Leftraru de la Universidad de Chile.
- La modelación con Celeris se realizó en un computador personal con una tarjeta gráfica (GPU) dedicada.

METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

BATIMETRÍA REAL Y DOMINIO DE CÁLCULO

La batimetría del puerto de San Antonio fue procesada por medio del software Global Mapper y Mike Zero Bathymetries.

Inicio:

UTM 19 H 256326 E, 6279600 S

Fin:

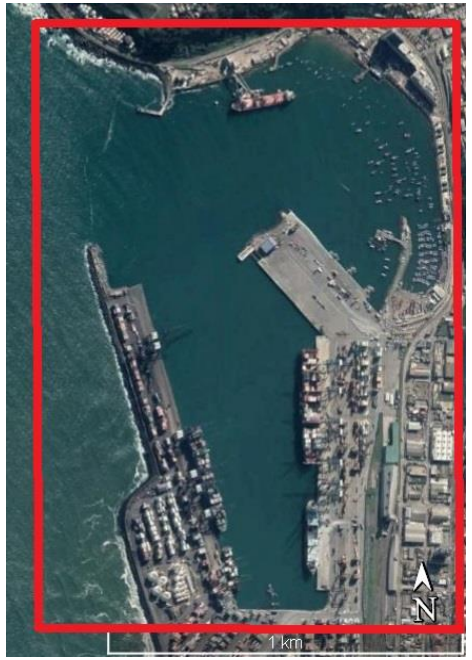
UTM 19 H 257548 E, 6281312 S

Nodos x: 611

Nodos y: 856

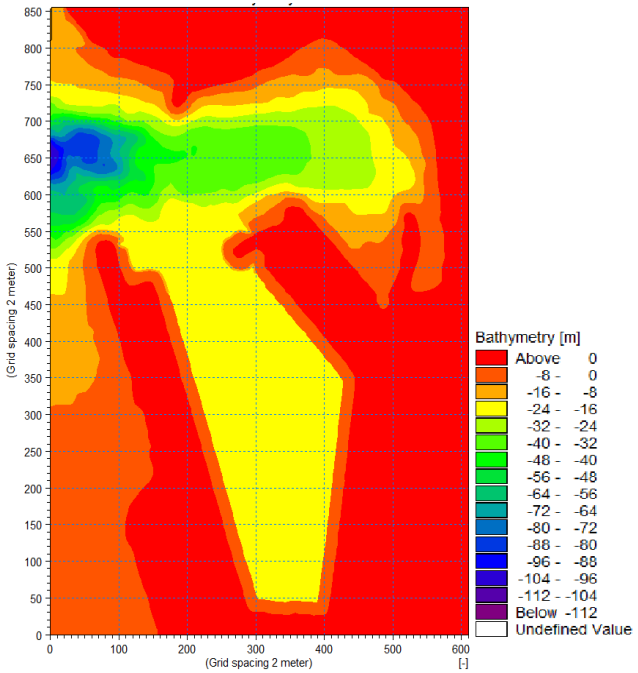
Distancia x: 1222 [m]

Distancia y: 1712 [m]



Dominio de cálculo

Fuente: Google Earth



Batimetría final utilizada

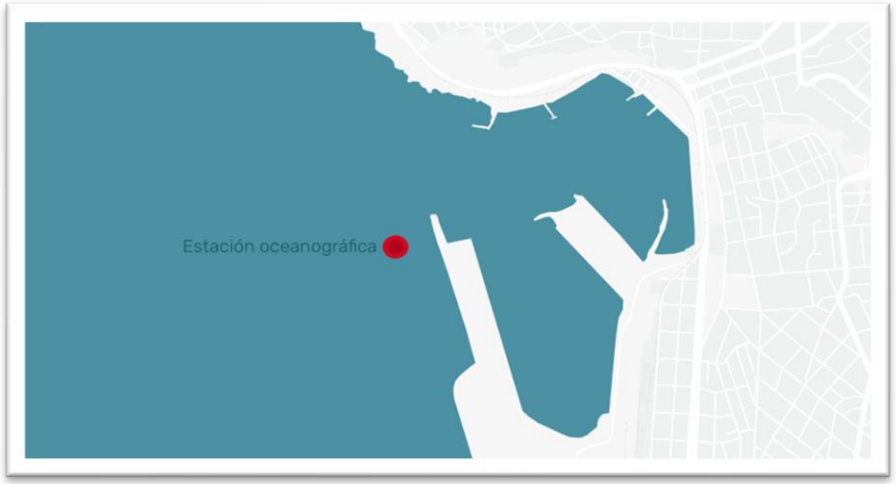
Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

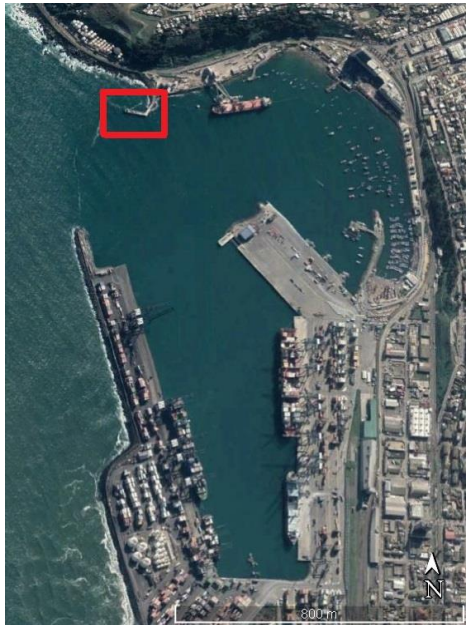
ANÁLISIS DE CLIMA MEDIO

A fin de analizar el clima reinante, se realizaron análisis de clima medio para los datos del ADCP y de la Universidad de Valparaíso en el nodo del ADCP, y para los datos del sitio 9 en el mismo sitio 9.



Ubicación ADCP

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



Ubicación sitio 9

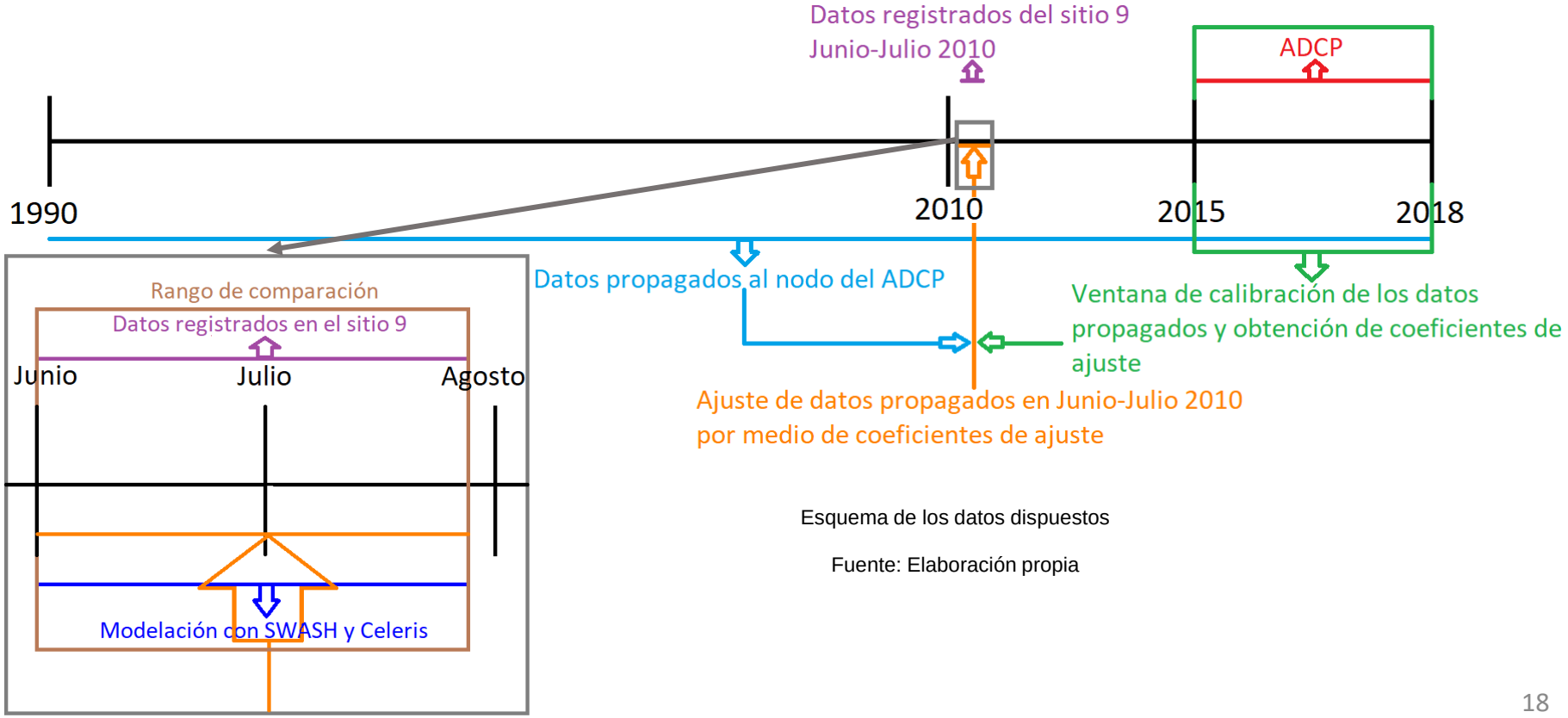
Fuente: Google Earth

METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

CALIBRACIÓN DE LOS DATOS DE CONDICIÓN DE BORDE INICIAL

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



Esquema de los datos dispuestos

Fuente: Elaboración propia

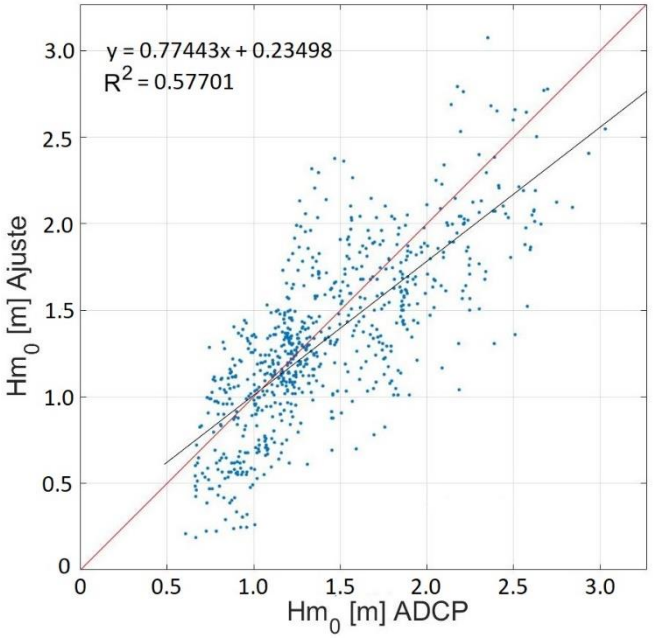
METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

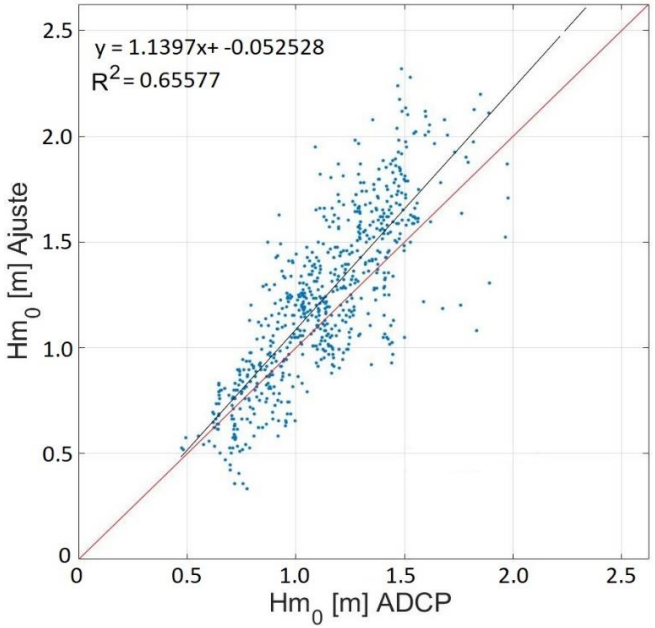
CALIBRACIÓN DE LOS DATOS DE CONDICIÓN DE BORDE INICIAL

Los ajustes realizados fueron discretizados de acuerdo a las direcciones de incidencia del oleaje.

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



Ajuste por mínimos cuadrados junio-julio 2015-2018 WNW
Fuente: Elaboración propia



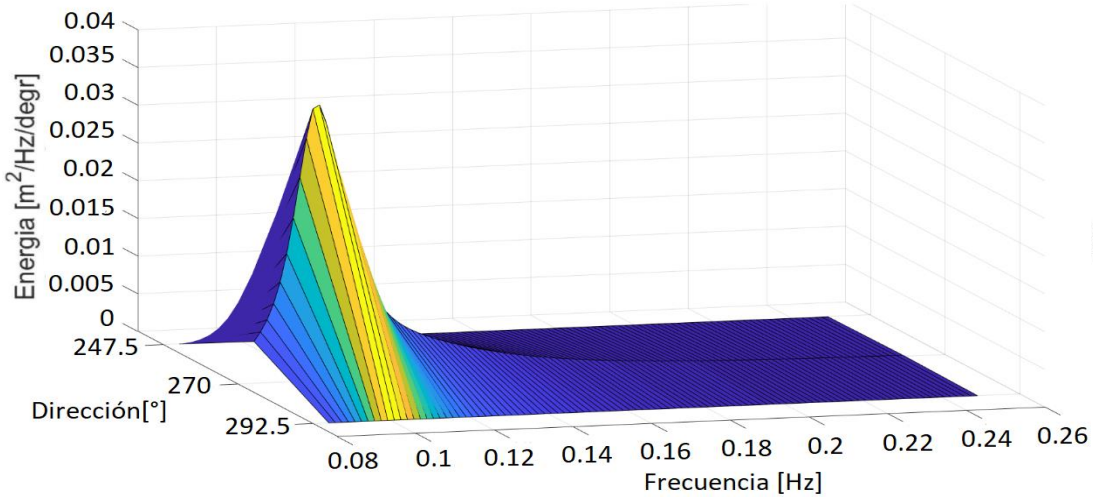
Ajuste por mínimos cuadrados junio-julio 2015-2018 W
Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

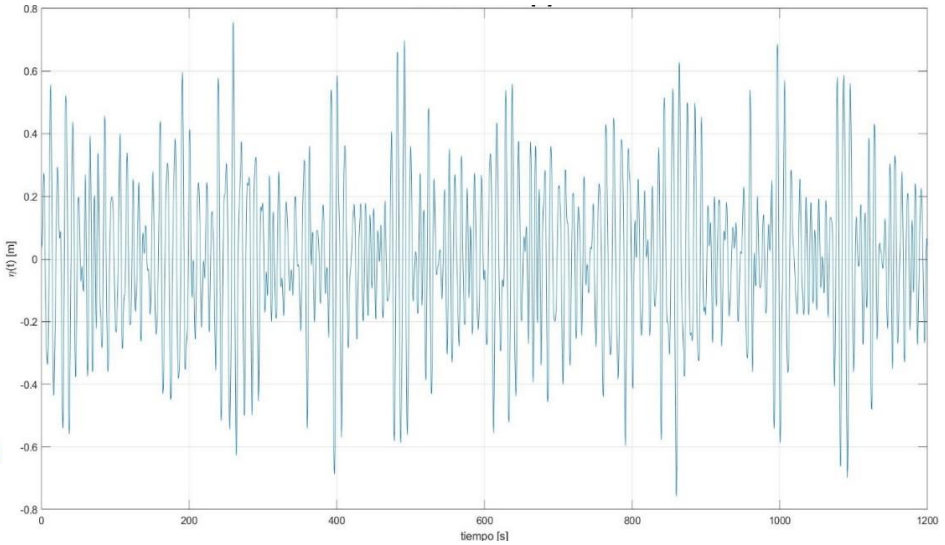
SELECCIÓN DE CLIMAS DE OLEAJE

Se corrieron 560 casos en SWASH y 661 en Celeris para la dirección Oeste, 243 casos en SWASH y 207 en Celeris para la dirección Oeste-Noroeste, con lo que se modelaron en total 803 casos para SWASH y 868 para Celeris.



Espectro direccional sintético JONSWAP

Fuente: Elaboración propia



Desnivelaciones asociadas al espectro JONSWAP

Fuente: Elaboración propia

METODOLOGÍA

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

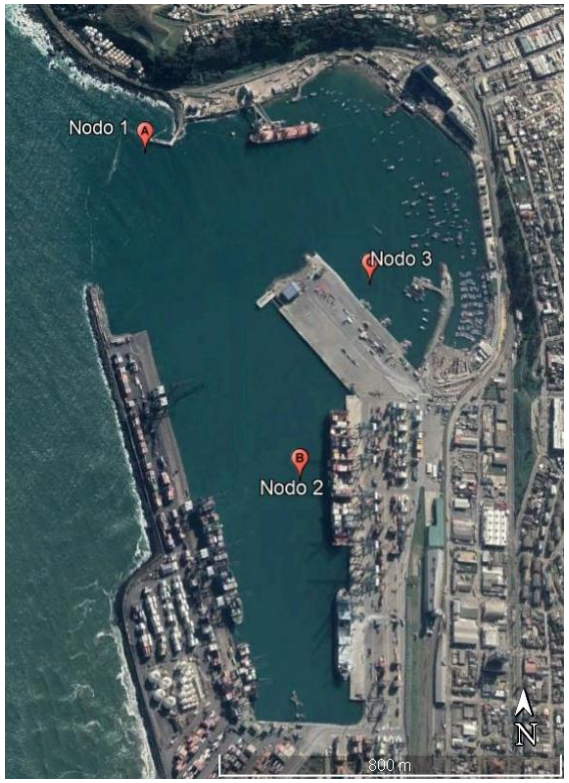
OBTENCIÓN DE LOS DATOS

Se registraron desnivelaciones durante 20 minutos, de las cuales por medio de un script en MatLab, se obtuvieron parámetros espectrales.

Nodo 1 (en el sitio 9)
Coordenada UTM 19 H 256616 E, 6281002 S

Nodo 2
Coordenada UTM 19 H 257003 E, 6280200 S

Nodo 3
Coordenada UTM 19 H 257184 E, 6280681 S



Ubicación nodos de registro

Fuente: Google Earth.

RESULTADOS

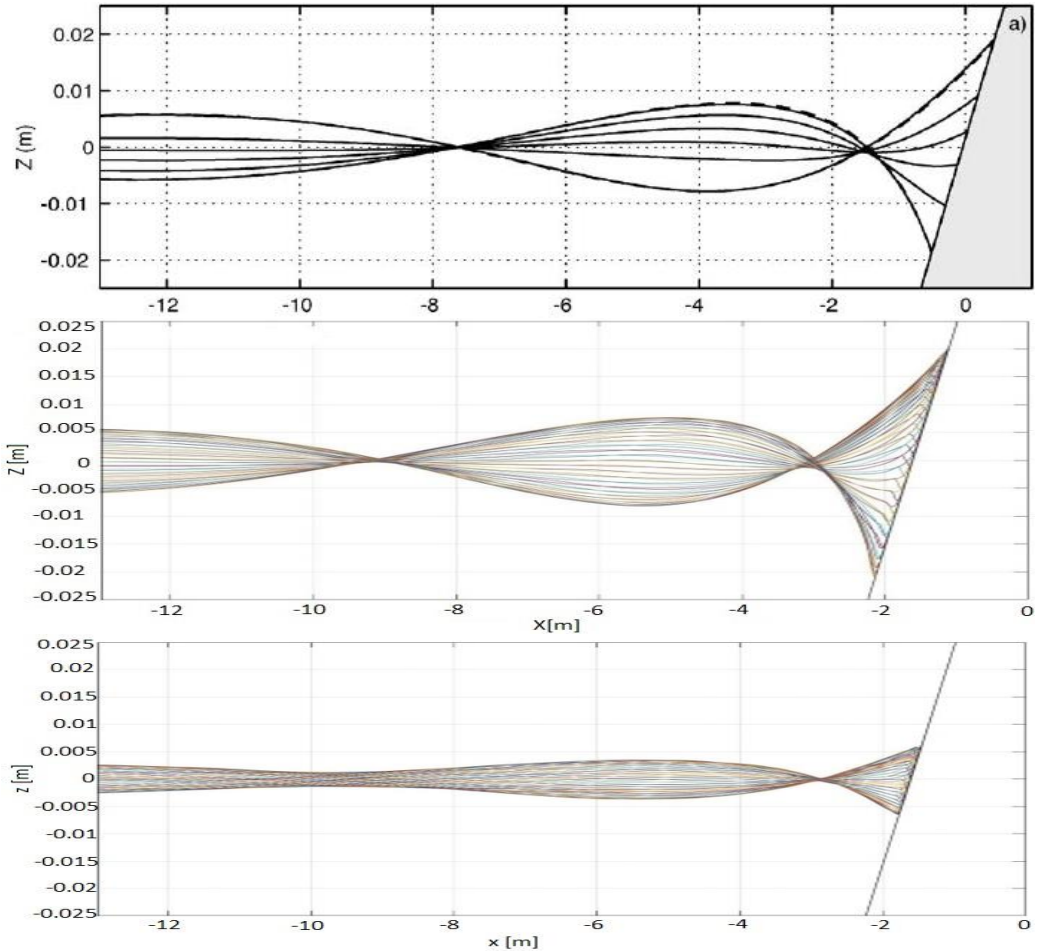
MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

REPRODUCCIÓN DEL EXPERIMENTO

Experimento Lynett et al. (2002)

SWASH

Celeris



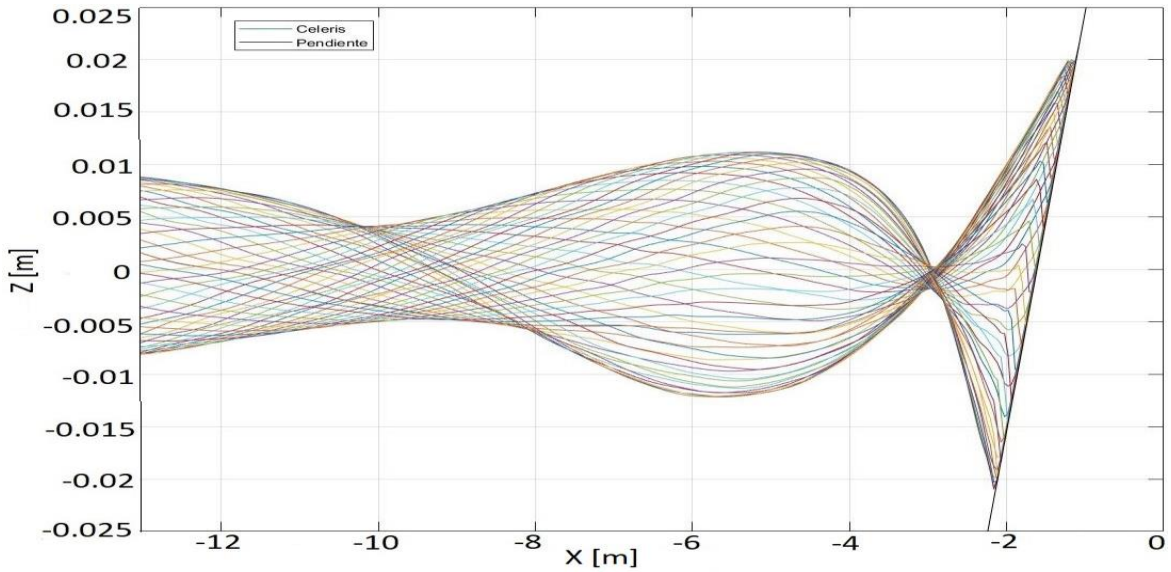
Desnivelaciones calculadas por: a) Lynett et al. (2002), b) SWASH y c) Celeris para diferentes instantes de tiempo.
Fuente: a) Lynett et al. (2002), b) y c) Elaboración propia.

RESULTADOS

MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

REPRODUCCIÓN DEL EXPERIMENTO

Como se muestra en la ilustración siguiente las distancias de run-up y run-down concuerdan. Sin embargo las desnivelaciones en el resto del canal fueron completamente diferentes.



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

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

REPRODUCCIÓN DEL EXPERIMENTO

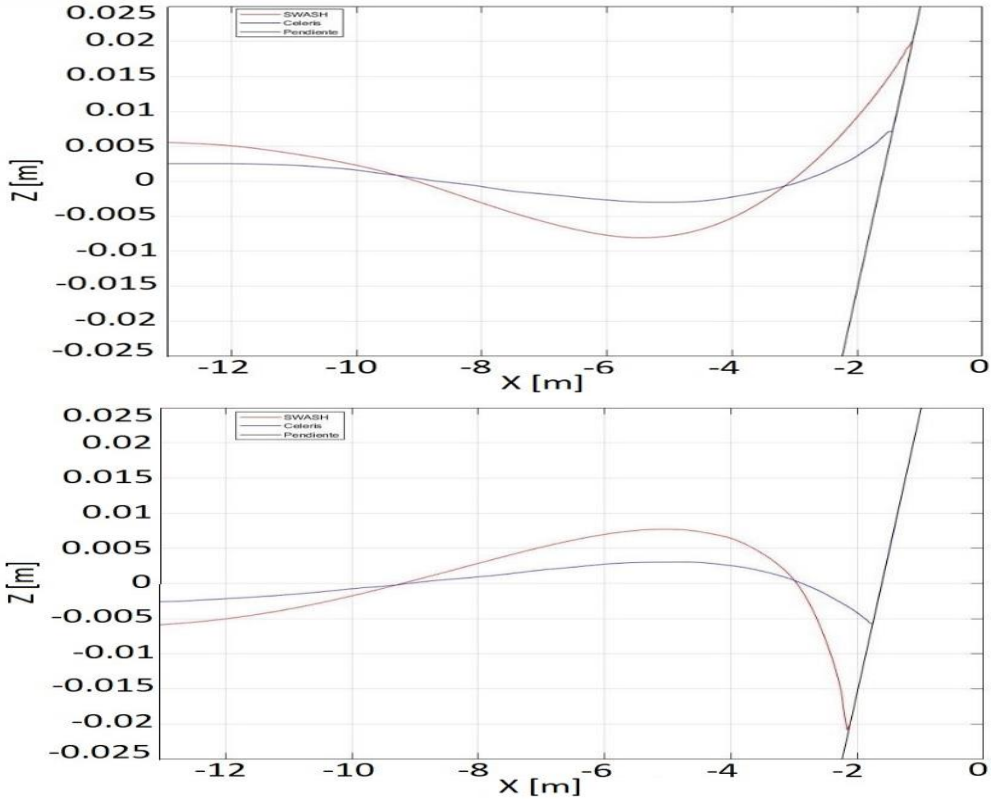
Comparación del run-up máximo y run-down mínimo entre SWASH (línea roja) y Celeris (línea azul)

Run-up máximo

SWASH: 0.02[m]
Celeris: 0.0074[m]
Diferencia: 63%

Run-down mínimo

SWASH: - 0.02[m]
Celeris: -0.0055[m]
Diferencia: 72.5%



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

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

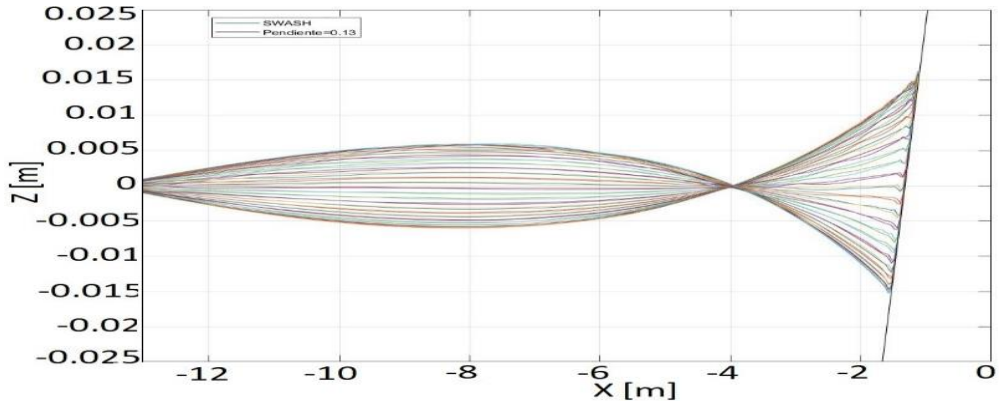
MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

REPRODUCCIÓN DEL EXPERIMENTO

Extensión del experimento de Lynett et al. (2002) a pendiente 0.13

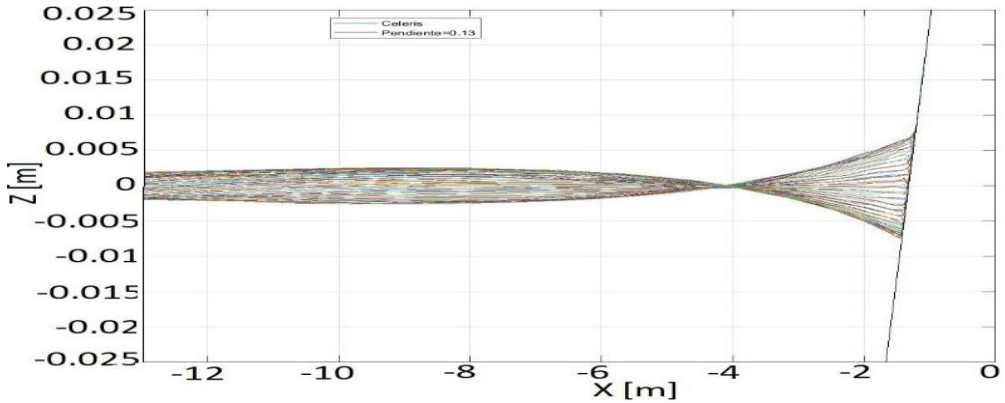
SWASH

Run-up: 0.016[m]
Run-down: -0.015[m]



Celeris

Run-up: 0.006[m]
Run-down: -0.0065[m]



Diferencia entre los modelos
Run-up: 62.5%
Run-down: 56.6%

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

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

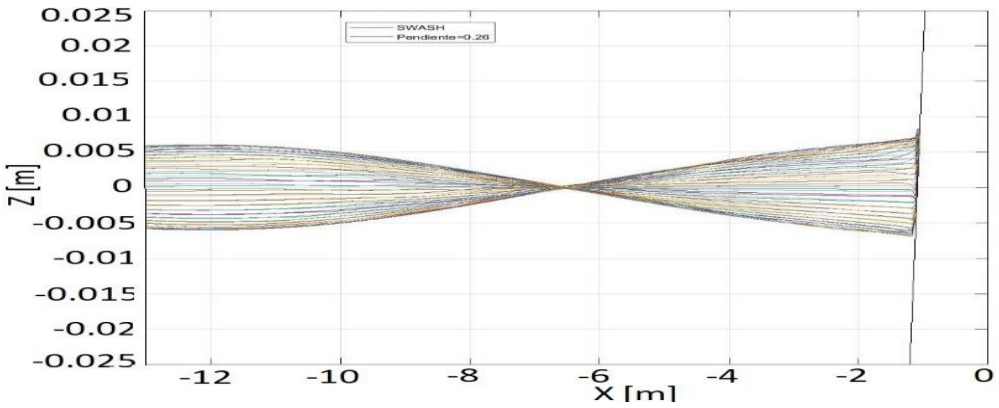
MODELACIÓN DEL EXPERIMENTO LYNETT ET AL. (2002)

REPRODUCCIÓN DEL EXPERIMENTO

Extensión del experimento de Lynett et al. (2002) a pendiente 0.26

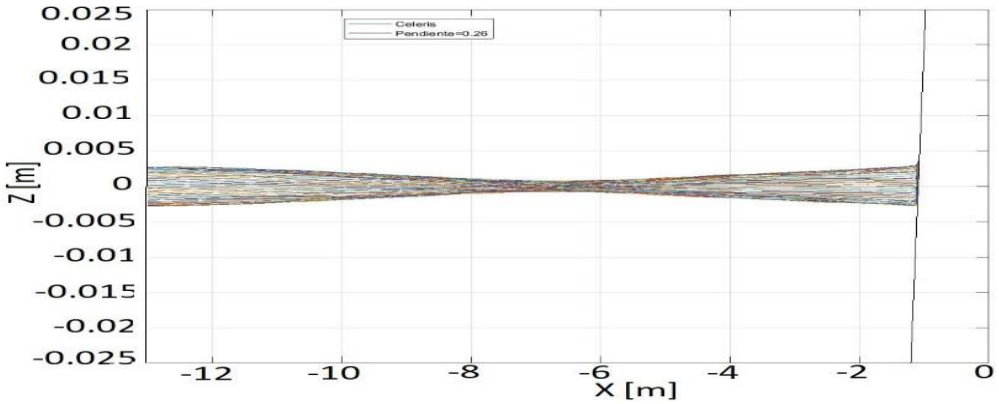
SWASH

Run-up: 0.008[m]
Run-down: -0.006[m]



Celeris

Run-up: 0.0025[m]
Run-down: -0.0025[m]



Diferencia entre los modelos
Run-up: 68.75%
Run-down: 58.3%

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

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL, COEFICIENTE DE ASOMERAMIENTO

Como resultado de estas modelaciones, se obtuvieron los coeficientes de agitación para toda la longitud de la batimetría. Con esto se pudo identificar cual modelo fue más sensible al cambio de profundidad.

El coeficiente de agitación se define como:

$$Ka = Ks * Kr * Kd$$

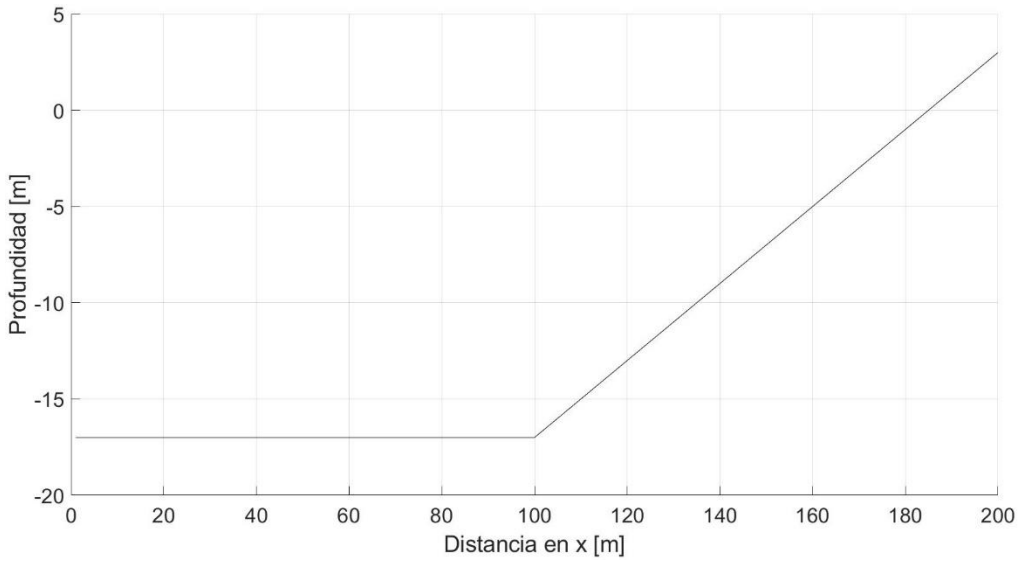
Que para este caso donde sólo está presente el asomeramiento se expresa de la siguiente manera:

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

RESULTADOS

MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL, COEFICIENTES DE ASOMERAMIENTO

Para tener una mejor perspectiva de los coeficientes de asomeramiento, se presenta una imagen de la batimetría ideal en elevación.



Batimetría ideal en elevación con pendiente 0.2.

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

MODELACIÓN IDEAL A ESCALA REAL, COEFICIENTES DE ASOMERAMIENTO

PERÍODO DE 6[s]

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

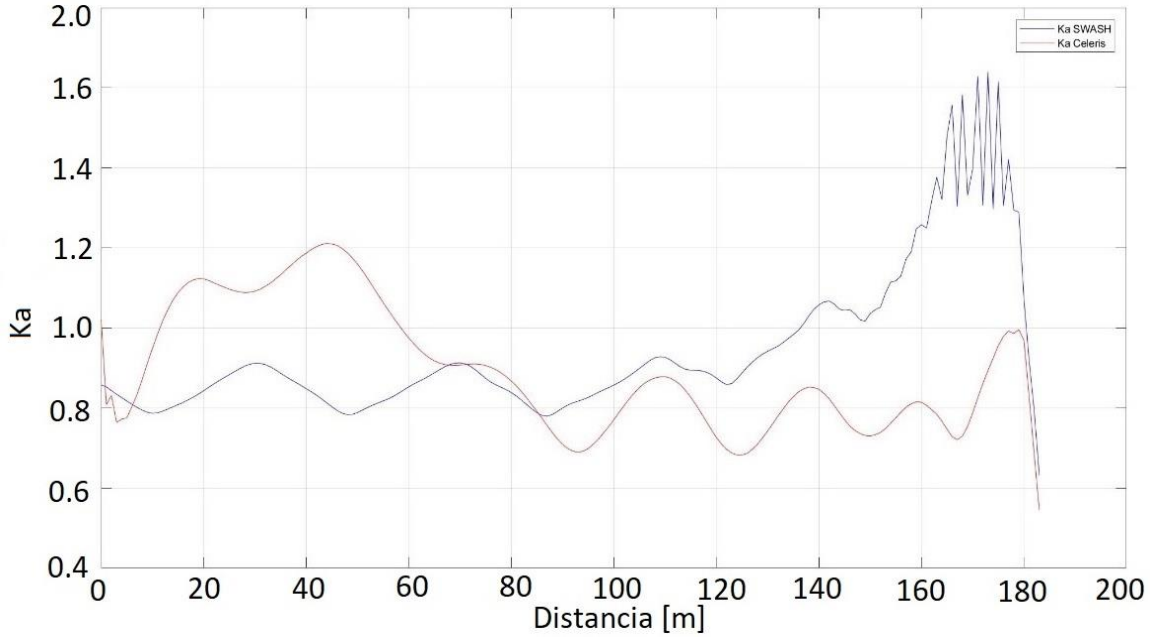


Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) Tp=6 [s], L= 77 [m].

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

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

PERÍODO DE 11[s]

Haciendo uso de la Ley de Green (1837), "*En la dinámica de fluidos, se describe la evolución de olas de gravedad que no rompen, y que se propagan en aguas poco profundas aumentando su altura al aproximarse a la costa*". La ley de Green se usa a menudo en la ingeniería costera para la modelación de olas largas en una playa.

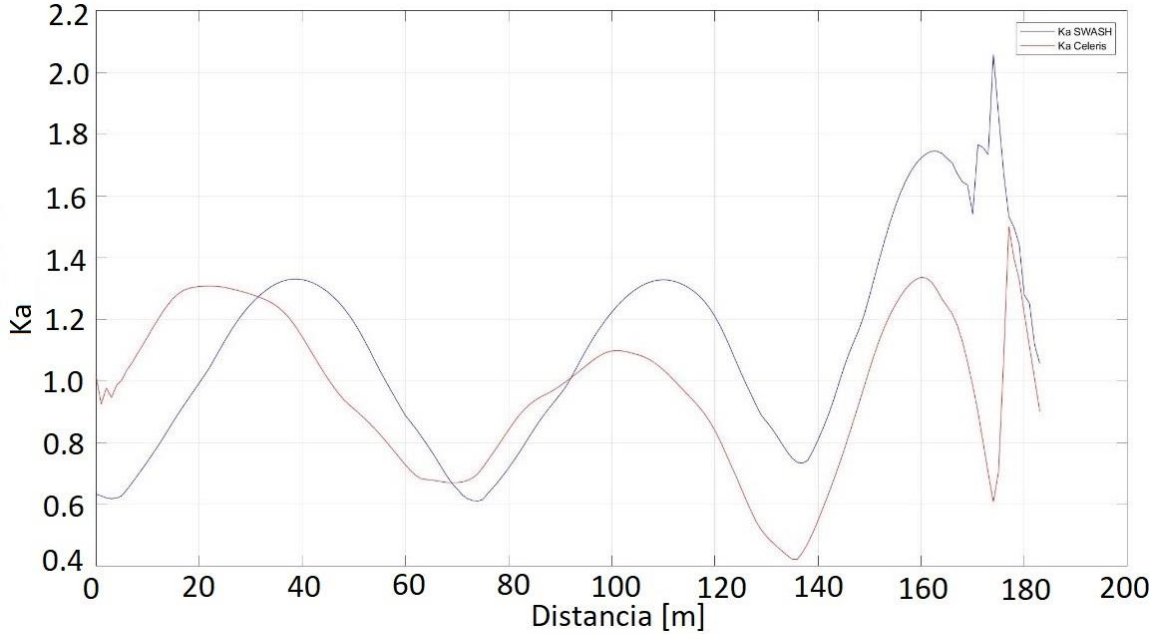


Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) Tp=11 [s], L= 142 [m].

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

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

PERÍODO DE 17[s]

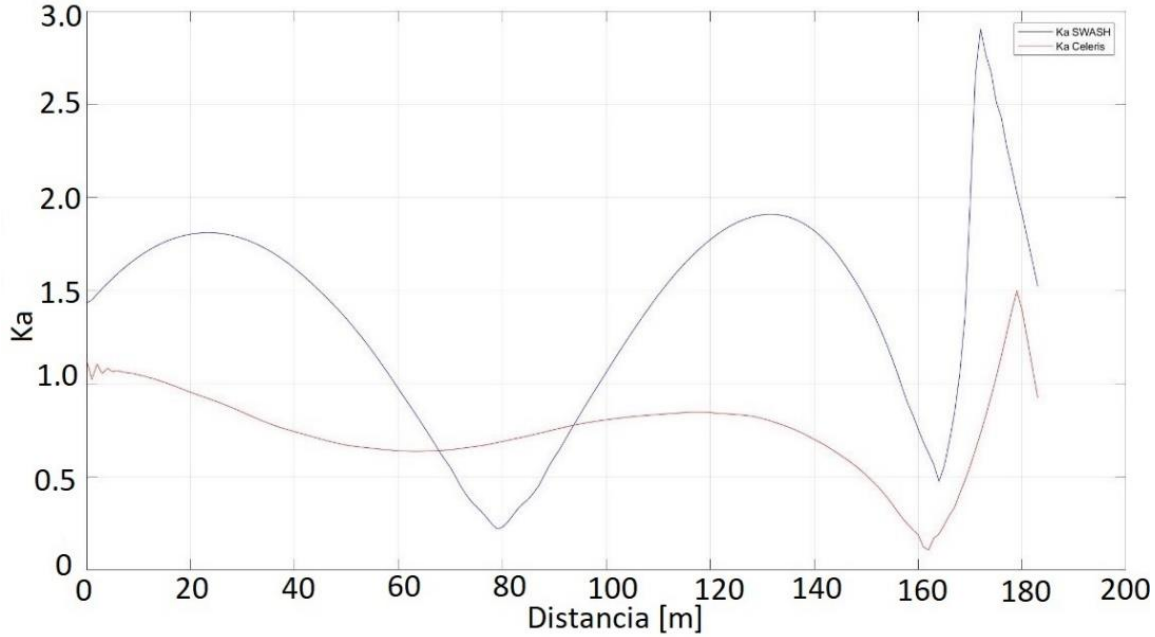


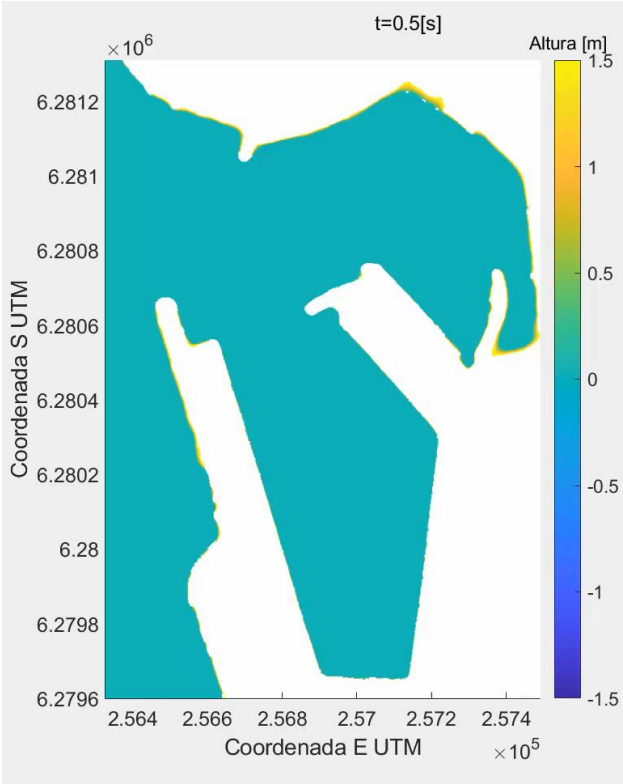
Gráfico de Coeficiente de agitación (asomeramiento) Tp=17 [s], L=219 [m].

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

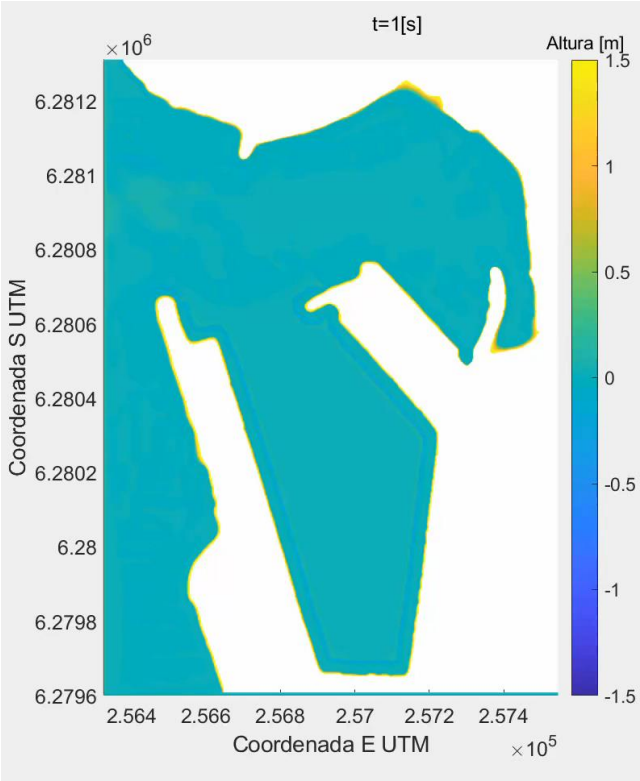
MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

Para mostrar cómo es que los modelos resolvieron las condiciones de oleaje ingresadas, se presentan las modelaciones del puerto de San Antonio realizada con ambos modelos, para $Hm_0 = 1.4566[m]$ y un $Tp = 14.99[s]$.



Modelación del puerto de San Antonio. SWASH

Fuente: Elaboración propia



Modelación del puerto de San Antonio. Celeris

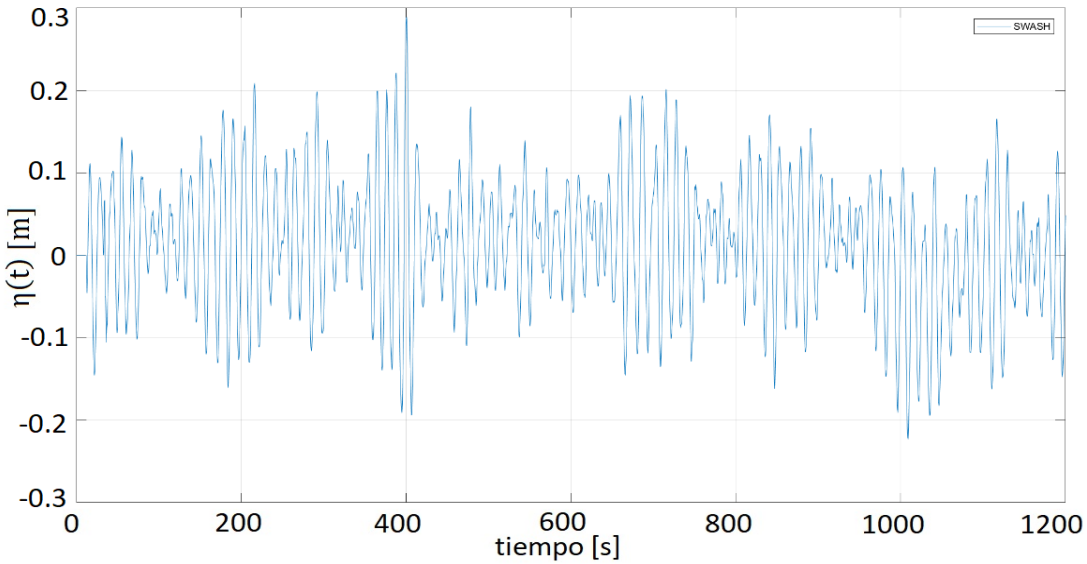
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

DESNIVELACIONES Y ESPECTROS

Una muestra de las desnivelaciones se presenta en la ilustración.



Ejemplo de desnivelaciones en nodo sitio 9

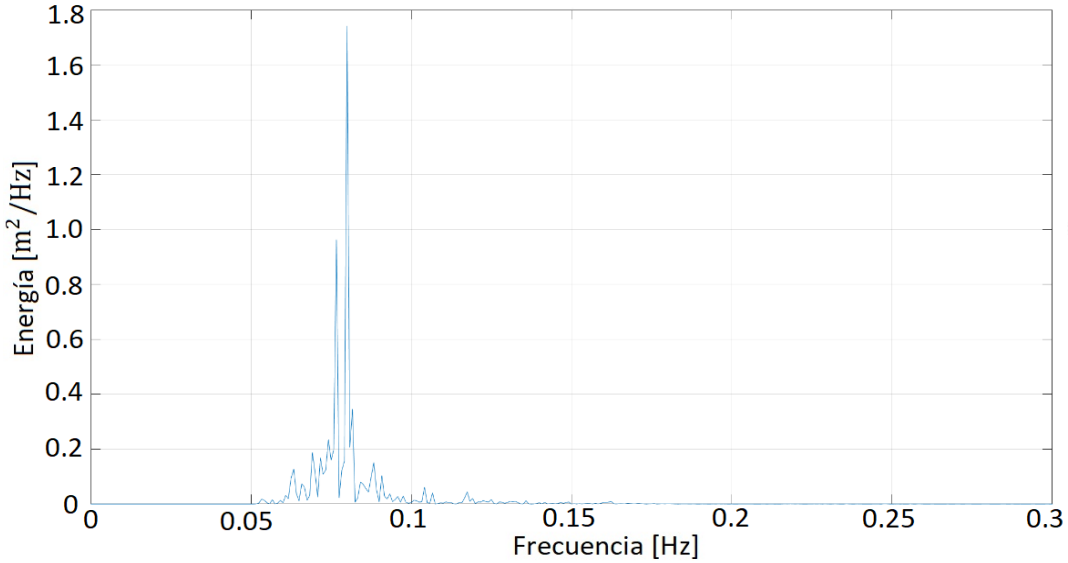
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

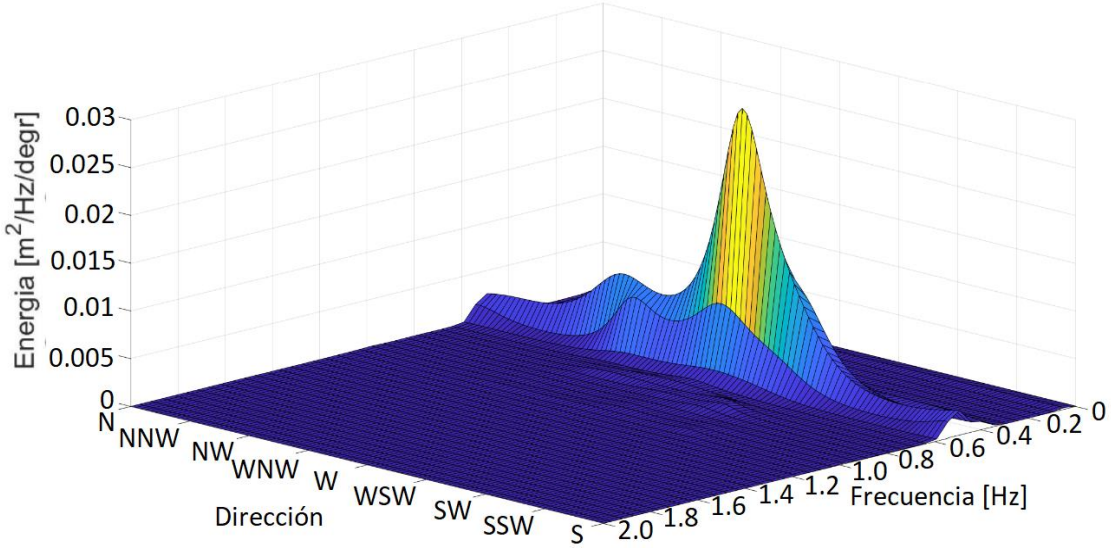
DESNIVELACIONES Y ESPECTROS

Al procesar las desnivelaciones se obtuvieron los espectros de frecuencias, los espectros direccionales, la altura significativa espectral, la altura significativa del tercio superior, el período peak, la dirección peak, entre otros.



Espectro de frecuencias.

Fuente: Elaboración propia



Espectro direccional

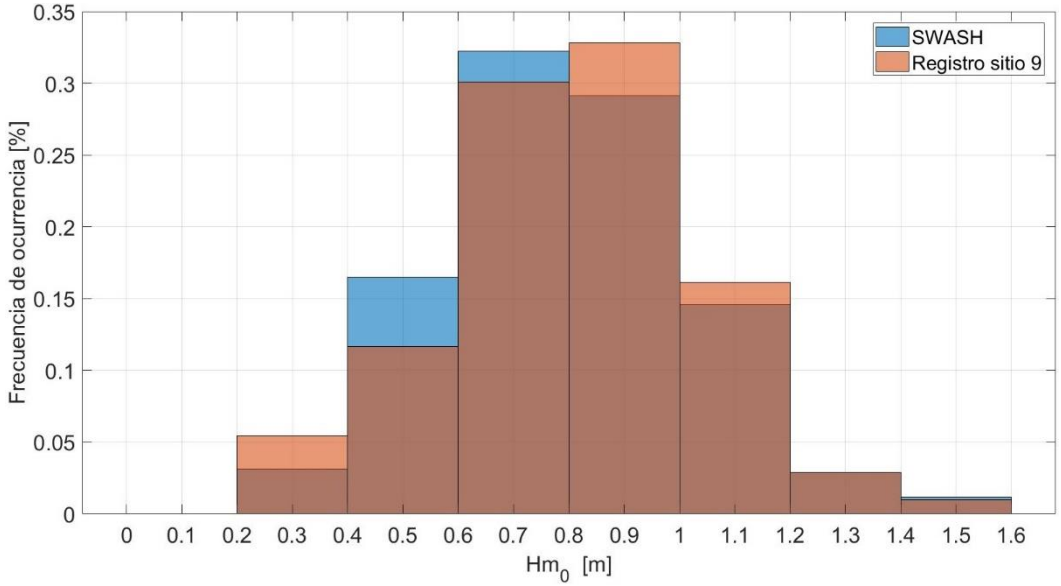
Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

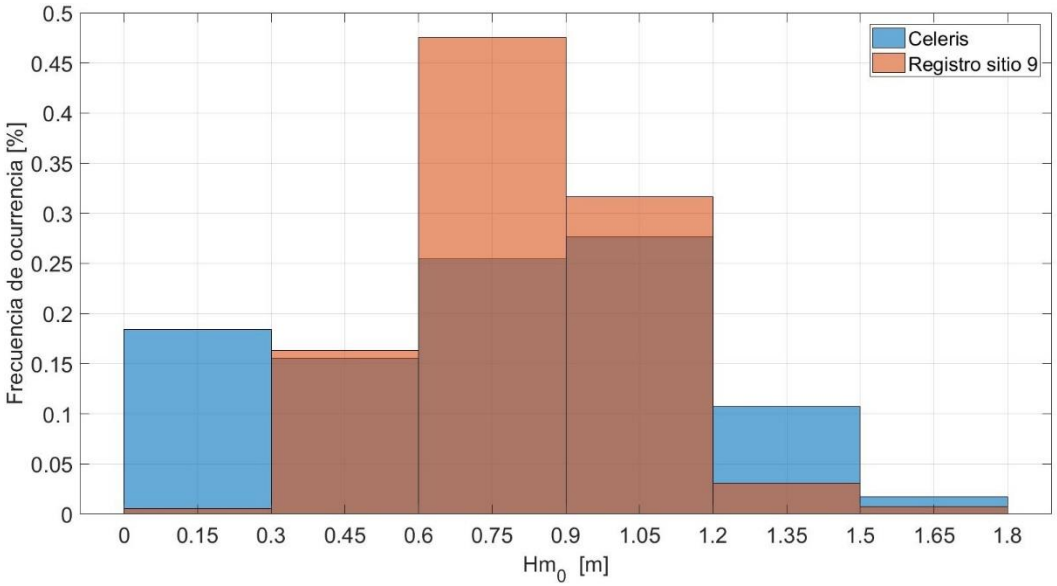
PARÁMETROS DE RESUMEN Y CORRELACIONES

Comparación de alturas significativas espectrales con ambos modelos respecto al sitio 9



Histograma combinado de Hm0, SWASH y registros sitio 9.

Fuente: Elaboración propia.



Histograma combinado de Hm0, Celeris y registros sitio 9

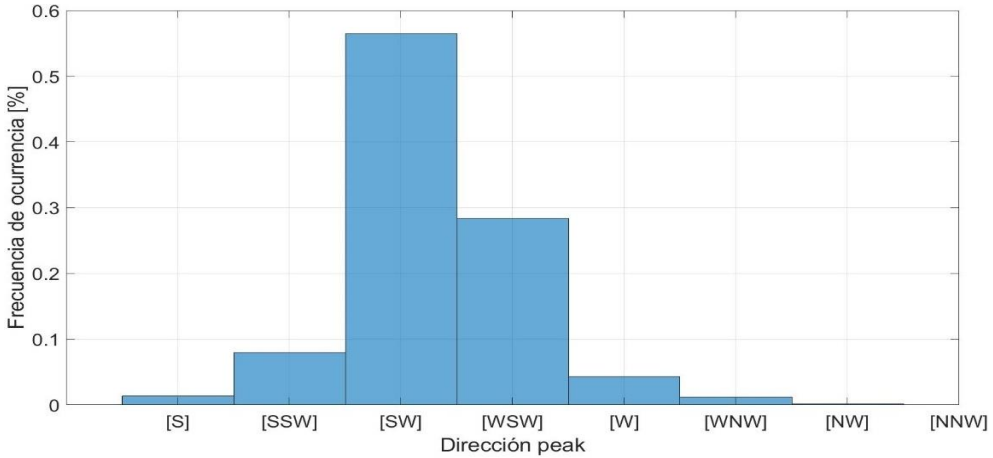
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

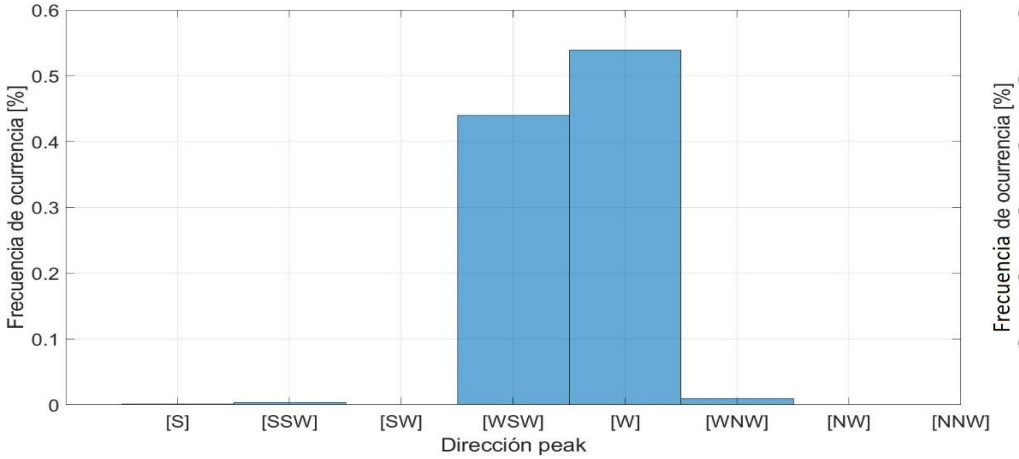
MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

PARÁMETROS DE RESUMEN Y CORRELACIONES

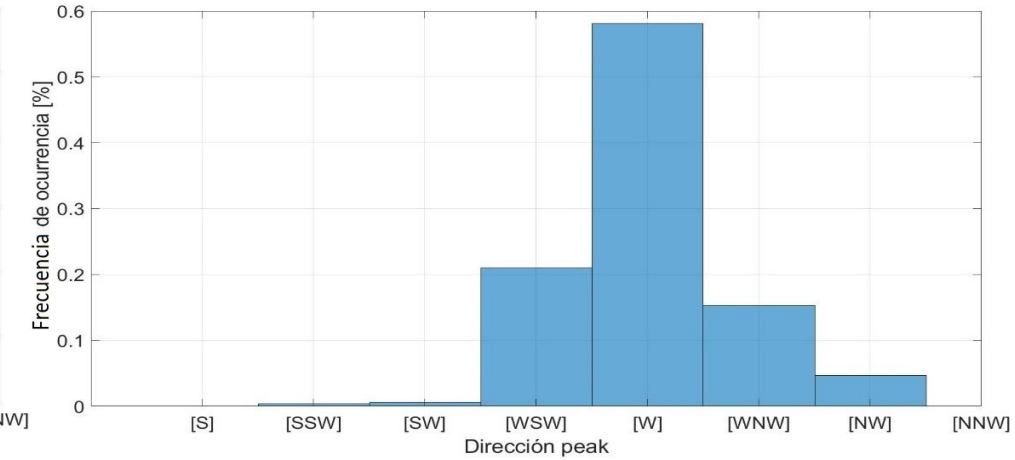
Comparación de direcciones



Histograma de direcciones peak sitio 9
Fuente: Elaboración propia



Histograma de direcciones peak nodo sitio 9, SWASH
Fuente: Elaboración propia



Histograma de direcciones peak, nodo sitio 9 Celeris
Fuente: Elaboración propia

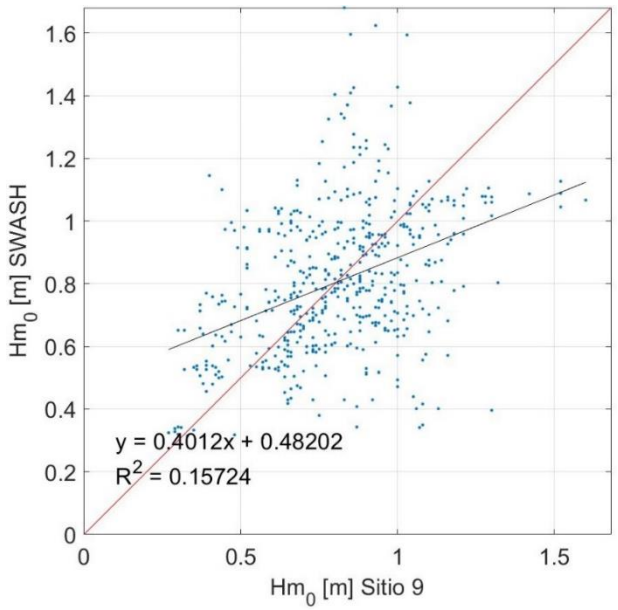
RESULTADOS

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

PARÁMETROS DE RESUMEN Y CORRELACIONES

SWASH

- Pendiente de la recta de regresión 0.4
- Coeficiente R^2 0.15
- Error medio cuadrático 0.0648
- Covarianza 0.053
- Sesgo 0.41

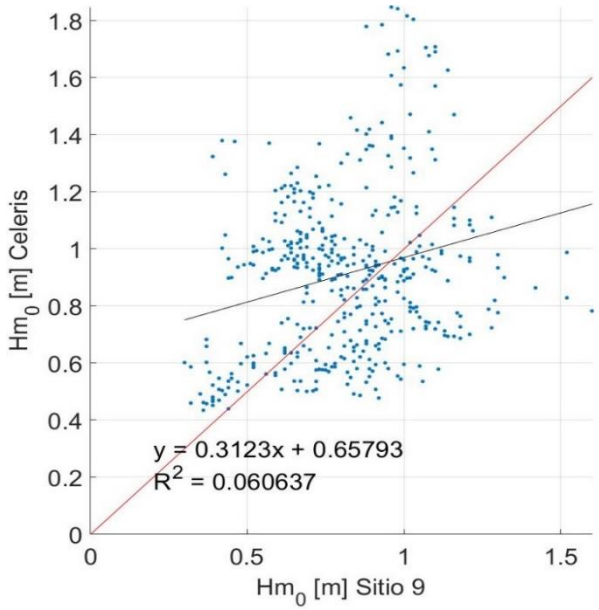


Correlación entre modelo SWASH y datos sitio 9

Fuente: Elaboración propia.

Celeris

- Pendiente de la recta de regresión 0.31
- Coeficiente R^2 0.06
- Error medio cuadrático 0.11
- Covarianza 0.053
- Sesgo 0.1414



Correlación entre modelo Celeris y datos sitio 9

Fuente: Elaboración propia

DISCUSIONES

MODELACIÓN DEL PUERTO DE SAN ANTONIO

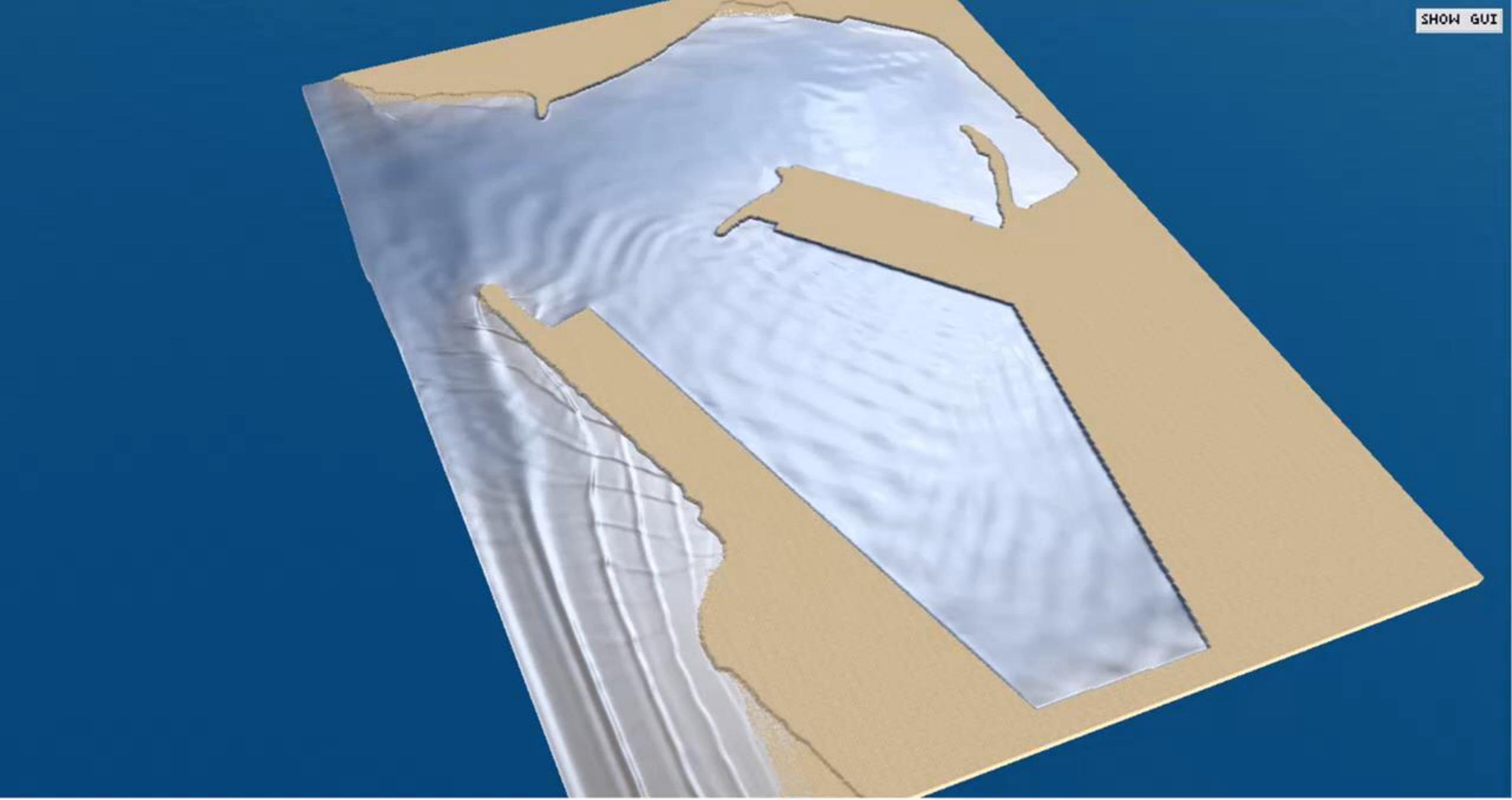
- Los datos con los que se contaron fueron escasos.
- Batimetría del Puerto de San Antonio.
- Direcciones.
- Períodos.
- Alturas.
- Incompatibilidad de los modelos.
- Hardware

CONCLUSIONES

1. En la batimetría ideal de Lynett así como la de escala real, los modelos NSWE como SWASH, funcionan de una manera excepcional en zonas costeras, incluso siendo capaz de representar de buena manera fenómenos como el run-up, run-down y la reflexión. Celeris al ser un modelo Boussinesq, no fue capaz de resolver los problemas del run-up y run-down en la playa.

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

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


SHOW GUI