

# Trabajo Fin de Grado

Modelización y simulación numérica de ondas superficiales en  
flujos costeros

Models and numerical simulation of surface waves in coastal  
flow

Autora

**Mónica Lacoma Marrodán**

Directores

**Dr. Sergio Martínez Aranda**

**Dr. Javier Fernández Pato**

Titulación de la autora

**Grado en Ingeniería Mecánica**

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

2023



## AGRADECIMIENTOS

Quería dedicar unas breves líneas de agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible que haya llegado hasta aquí.

En primer lugar, a mi madre y a mi padre, todo el apoyo y valores que me han inculcado a lo largo de la vida me han hecho una persona con ganas de luchar, labrarme un futuro y un día llegar a utilizar mis conocimientos para ayudar. En segundo lugar, a mis hermanos, familia, amigas y amigos por siempre creer en mí y estar junto a mí en cualquier circunstancia.

Por otro lado, gracias a Pilar García Navarro por proponerme este Trabajo de Fin de Grado y darme un voto de confianza sin conocerme. Por supuesto, a mis directores Sergio Martínez Aranda y Javier Fernández Pato por haberme enseñado tantas cosas tanto a nivel académico como personal. La elaboración de este proyecto me ha adentrado en un campo de estudio desconocido para mí y que ahora me apasiona.

Muchas gracias a todo el Grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza por acogerme todos estos meses y a la Universidad de Zaragoza y todo el profesorado por inculcarme conocimientos que han incrementado mi fascinación por la ingeniería mecánica.

Por último lugar, una especial mención a Mariana. Sin ti nada de esto hubiera sido posible, infinitas gracias por el apoyo incondicional en todo momento cuando no podía más y me faltaban energías.





## **Modelización y simulación numérica de ondas superficiales en flujos costeros**

### **RESUMEN**

El estudio del comportamiento de los tsunamis y el uso de herramientas computacionales predictivas es imprescindible para el diseño de medidas de protección y planes de evacuación. Para ello, es necesario el estudio de las ecuaciones gobernantes de este tipo de fenómenos y la posterior implementación de métodos numéricos para su resolución. En este trabajo se aborda la simulación numérica del tsunami de Hokkaido-Nansei-Oki, ocurrido el 12 de julio de 1993 en el valle de Monai (Japón). Se trata de un caso de estudio con mucha información sobre la evolución temporal del nivel de agua en distintos puntos del dominio, donde las olas llegaron a alcanzar amplitudes muy extremas de hasta 31,7m. La simulación numérica de un caso real tan complejo ayuda al desarrollo y perfeccionamiento de modelos computacionales que permiten simular el comportamiento del fenómeno. Además, resulta imprescindible que estos modelos sean eficientes, de forma que el tiempo computacional sea lo suficientemente bajo como para obtener resultados predictivos útiles a corto plazo. En este proyecto se estudia la implementación de modelos computacionales tanto tridimensionales (3D) mediante el programa Ansys Fluent como bidimensionales (2D) mediante el software RiverFlow2D, así como un análisis complementario de la influencia del término de fricción. Los resultados muestran una buena concordancia con las medidas experimentales disponibles, especialmente en el modelo bidimensional.

## **Models and numerical simulation of surface waves in coastal flow**

### **ABSTRACT**

The analysis of tsunami behaviour and the handling of predictive computational tools is essential for the development of protection measures and evacuation plans. For this purpose, it is necessary to study the governing equations of this type of phenomena and the subsequent implementation of numerical methods. This report deals with the numerical simulation of the Hokkaido-Nansei-Oki tsunami, which occurred on 12 July 1993 in the Monai Valley (Japan). This case is provided with many information on the temporal evolution of the water level at different points in the domain, where the waves reached such a extreme amplitudes of up to 31,7m. The numerical simulation of such a complex real case helps to the development and refinement of computational models to simulate the behaviour of the phenomenon. Furthermore, efficient models are necessary so that the computational time is low enough to obtain useful predictive results in the short term. This project studies the implementation of both three-dimensional (3D) computational models using the Ansys Fluent programme and two-dimensional (2D) models using the RiverFlow2D software, as well as a complementary analysis of the influence of the friction term. The results show good agreement with the available experimental measurements, especially in the two-dimensional model.



# Índice general

---

<b>Índice de Figuras</b>	<b>VII</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2. Marco teórico y caso de estudio</b>	<b>3</b>
2.1. Marco teórico . . . . .	3
2.2. Descripción del caso de estudio . . . . .	4
<b>3. Modelo matemático</b>	<b>7</b>
3.1. Formulación 3D: Volume of Fluid (VOF) . . . . .	7
3.2. Formulación 2D: Shallow Water Equations (SWE) . . . . .	8
<b>4. Modelos computacionales</b>	<b>11</b>
4.1. Modelo tridimensional: Ansys Fluent . . . . .	12
4.1.1. Mallado dominio 3D . . . . .	12
4.1.2. Solución numérica de las ecuaciones tridimensionales . . . . .	12
4.1.3. Condiciones de contorno . . . . .	13
4.1.4. Condiciones iniciales . . . . .	13
4.2. Modelo bidimensional: RiverFlow2D . . . . .	13
4.2.1. Mallado dominio 2D . . . . .	13
4.2.2. Solución numérica de las ecuaciones bidimensionales . . . . .	13
4.2.3. Condiciones de contorno e iniciales . . . . .	14
<b>5. Resultados</b>	<b>15</b>
5.1. Modelo 3D . . . . .	15
5.2. Modelo 2D . . . . .	16
5.3. Estudio de convergencia de malla. . . . .	17
5.4. Relación de la elevación de la superficie libre con la velocidad . . . . .	20
5.5. Estudio de influencia del término de fricción . . . . .	21
<b>6. Conclusiones</b>	<b>25</b>
<b>7. Bibliografía</b>	<b>27</b>



## Índice de Figuras

---

1.1. Localización del epicentro del terremoto (izquierda) y vista aérea de las islas Tairajima y Monai y valle de Monai (derecha). . . . .	1
2.1. Representación tridimensional de la topografía de estudio ( $z_b$ ) junto con las alturas máximas registradas de las olas a lo largo del valle de Monai. . . . .	4
2.2. Experimento CRIEPI. . . . .	5
2.3. Representación tridimensional de la topografía del modelo a escala y posición de las sondas de medida del nivel de agua. . . . .	5
2.4. Condición de contorno a la entrada. . . . .	5
2.5. Datos experimentales de las sondas $P_1$ , $P_2$ y $P_3$ . Obtenidos por CRIEPI. . . .	6
3.1. Variables características del dominio 3D (Calado $h$ , nivel de fondo $z_b$ y nivel superficial $wse$ ). . . . .	7
3.2. Variables características del dominio 2D (Calado $h$ , nivel de fondo $z_b$ y nivel superficial $wse$ ). . . . .	9
4.1. Perfiles topográficos y sondas analizadas. . . . .	11
4.2. Mallado de la superficie libre y del fondo marino en Ansys. . . . .	12
4.3. Mallado del dominio 2D. Malla gruesa (izquierda) y malla fina (derecha). . .	14
5.1. Velocidad en la superficie libre. . . . .	15
5.2. Residuales (izquierda) y paso de tiempo (derecha). . . . .	15
5.3. Velocidad a la entrada (izquierda) y elevación de la superficie libre a la entrada (derecha). . . . .	16
5.4. Elevación de la superficie del agua en las sondas $P_1$ , $P_2$ y $P_3$ para el modelo 3D y comparación con las medidas experimentales. . . . .	16
5.5. Estudio de convergencia de malla. Comparación con datos experimentales. . .	18
5.6. Estudio de convergencia de malla. . . . .	19
5.7. Gráficas del estudio de convergencia de malla. . . . .	20
5.8. $wse$ en $t = 12,5s$ (izquierda) y $v$ en $t = 12,5s$ (derecha) . . . . .	20
5.9. $wse$ en $t = 17,5s$ (izquierda) y $v$ en $t = 17,5s$ (derecha). . . . .	21
5.10. $wse$ en $t = 25s$ (izquierda) y $v$ en $t = 25s$ (derecha). . . . .	21
5.11. Variación del término de fricción y comparación con datos experimentales. . .	22
5.12. $RMSE$ - Estudio del término de fricción. . . . .	22
5.13. Estudio de influencia del término de fricción. . . . .	23



## Índice de Tablas

---

4.1. Localización espacial de cada una de las sondas. . . . .	11
5.1. Modelos computacionales. . . . .	17
5.2. $RMSE$ de cada una de las mallas simuladas. . . . .	19
5.3. Tiempos computacionales de cada una de las mallas simuladas. . . . .	20
5.4. Errores $RMSE$ para cada uno de los coeficientes de rugosidad de Manning ensayados. . . . .	21





# Capítulo 1

## Introducción y objetivos

---

Un tsunami se define como un conjunto de olas grandes en serie causadas por un terremoto submarino, un deslizamiento de tierra, una erupción volcánica o incluso por la colisión de un meteorito de grandes dimensiones con el océano [1]. Los tsunamis son fenómenos naturales potencialmente muy destructivos, capaces de generar enormes daños materiales y pérdidas de vidas humanas. Por ello, es necesario el diseño de planes de riesgo y protocolos de actuación con el objetivo de minimizar estos efectos adversos.

El estudio del comportamiento de los tsunamis mediante modelos físicos a escala permite ensayar casos reales a escalas menores y modificar las diferentes condiciones del caso a estudiar de una manera sencilla, con el objetivo de modelizar distintos escenarios. Por otro lado, una alternativa a la utilización de modelos físicos reducidos es el empleo de modelos computacionales para la simulación de ondas de tsunami. Este tipo de modelos constituye una ventaja muy importante para el diseño de medidas de protección y planes de evacuación, ya que nos permite realizar múltiples simulaciones de una manera eficiente y precisa, si el modelo está correctamente calibrado.

El caso de estudio de este trabajo corresponde al tsunami que ocurrió el 12 de julio de 1993 a lo largo de la costa de Hokkaido y la isla de Okushiri (Japón), donde aproximadamente 120 personas de la pequeña isla de Okushiri perdieron la vida [2]. La mayor ola registrada fue de 31,7 metros de altura en el valle de Monai [3]. El epicentro del terremoto tuvo lugar en la localización que se muestra en la Figura 1.1 (izquierda). En la Figura 1.1 (derecha) se observan las islas Monai y Tairajima, junto con el valle de Monai.

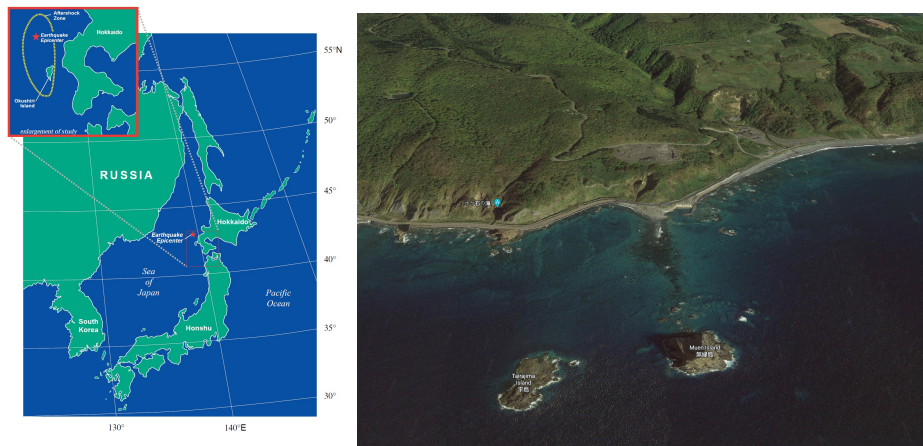


Figura 1.1: Localización del epicentro del terremoto (izquierda) y vista aérea de las islas Tairajima y Monai y valle de Monai (derecha).

El *Central Research Institute of Electric Power Industry* (CRIEPI), Abiko (Japón) elaboró un modelo físico a escala 1:400 en un canal de laboratorio donde se colocó un modelo de madera de la topografía mostrada en la Figura 1.1 (derecha). Gracias a este experimento, se obtuvieron las medidas de la evolución temporal del nivel de agua en distintos puntos que servirán como validación de los modelos numéricos.

En la literatura podemos encontrar distintos modelos para la simulación de tsunamis. Un ejemplo de modelo 3D es el TSUNAMI3D [4], donde se aplican las ecuaciones de Navier-Stokes en el plano tridimensional. Por otro lado, el modelo TUNAMI-N2 [5] resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas no lineales en 2D incluyendo los términos de fricción del fondo marino. Existen muchos otros modelos de características diferentes, la mayoría de ellos recopilados en [6].

En este trabajo de fin de grado se aborda la formulación de las ecuaciones gobernantes de este tipo de fenómenos, tanto en tres dimensiones (3D) como en dos (2D), así como su resolución numérica aproximada mediante dos programas comerciales de simulación de características muy diferentes, los cuales se comparan tanto en calidad de resultados como en eficiencia. Por un lado, se emplea el programa Ansys Fluent [7] para la simulaciones 3D y, por otro lado, RiverFlow2D [8] para las simulaciones 2D. El estudio, tanto de la calidad de los resultados como de los tiempos de cálculo, permite evaluar la posibilidad de mejorar los sistemas de alerta mediante el uso de simulaciones numéricas que proporcionen predicciones en tiempo real en este tipo de eventos.

El estudio de los tiempos de cálculo se realiza mediante el análisis de los tiempos en CPU (Central Processing Unit) y en GPU (Graphics Processing Unit). Por una parte, la CPU es la unidad central del ordenador, se encarga de todos los procesos necesarios para el funcionamiento de la computadora mediante unas unidades de procesamiento llamadas núcleos. Por otra parte, la GPU cuenta con un número de núcleos mucho más elevado, por lo que permite una paralelización masiva del cálculo, aumentando en gran medida el rendimiento del programa. En este trabajo se ha empleado un ordenador con una CPU Intel Core i7 10700F (2,90 Ghz) y una GPU NVIDIA GeForce Titan Black (2880 núcleos).

# Capítulo 2

## Marco teórico y caso de estudio

---

### 2.1. Marco teórico

Las ondas de superficie libre son ondas mecánicas en las que un medio físico se desequilibra, lo que produce oscilaciones que se propagan a través del medio [9]. Dichas ondas vuelven a su posición de equilibrio gracias a que poseen elasticidad e inercia. Las ondas superficiales en flujos costeros suelen ser producidas en la superficie libre en la entrefase agua-aire a causa del viento o las mareas siendo los períodos característicos de estas ondas de unos pocos segundos y comúnmente reciben el nombre de olas. Los tsunamis se forman a causa de erupciones volcánicas, diferentes tipos de terremotos, rotura de glaciares, explosiones ocasionadas por el ser humano o, incluso, el impacto de un meteorito en el océano [1].

Uno de los estudios más importantes obtenidos sobre las ondas de superficie tuvo sus inicios en los años 40 de la mano de Sverdrup y Munk [10]. En este estudio se planteó un método de previsión y una motivación para el estudio de ondas superficiales en océanos. En concreto, se propuso un método para estudiar las ondas superficiales creadas por el viento.

El estudio de las ondas superficiales en flujos costeros es imprescindible para la realización de planes de protección y evacuación. El objetivo principal es la búsqueda de estrategias para reducir el número de víctimas y minimizar los daños producidos por los tsunamis. En el caso del tsunami de Monai, la generación viene dada por el movimiento de placas tectónicas y su superposición a lo largo de las fallas transformantes. En este movimiento, el choque entre ellas produce la generación de ondas y junto con el movimiento ascendente de una de las placas se crean las olas que producen el maremoto.

Para caracterizar las ondas de un tsunami se define la velocidad de fase  $c$  [11]

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)} \quad (2.1)$$

para un determinado número de onda  $k$ , dado por

$$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2)$$

siendo  $\lambda$  la longitud de onda,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $h$  la profundidad del lecho marino o calado de agua.

Según la ecuación (2.1), las ondas de superficie aumentan su velocidad de propagación cuando se encuentran a mucha profundidad en el fondo marino y la altura de la onda es pequeña. En cambio, cuando la profundidad del fondo marino es reducida, la velocidad de propagación disminuye notablemente y la altura de la onda aumenta mucho. Por esta razón las ondas superficiales en flujos costeros y, aunque se trate de olas con una velocidad notablemente inferior, al llegar a la costa su amplitud es tan grande que los daños que ocasionan son catastróficos.

Cuando nos encontramos en aguas poco profundas ( $h \ll \lambda$ ), se puede aproximar  $\tanh(kh) \simeq kh$ , por lo que la velocidad de fase se puede formular mediante la ecuación

$$c = \sqrt{gh} \quad (2.3)$$

## 2.2. Descripción del caso de estudio

El 12 de julio de 1993 el terremoto de Hokkaido-Nansei-Oki ocasionó un tsunami que devastó una inmensa región costera de Japón. El terremoto registró una magnitud de 7,8 grados en la escala de Richter y en un lapso de tiempo inferior a 5 minutos se generaron olas de entre 15 y 32 metros de altura, aproximadamente.

El 13 de julio un equipo de científicos japoneses y estadounidenses evaluaron los daños y realizaron mediciones exhaustivas del siniestro. Estas medidas se basaron en las huellas de marcas de agua en edificios y estructuras, escombros arrastrados y búsqueda de relojes detenidos en el momento exacto de la llegada del tsunami. Se estimó que las consecuencias del terremoto fueron el deslizamiento de 2,5 metros en el plano de falla, lo que ocasionó una subducción del fondo del Mar de Japón en la zona norte del país, afectando inicialmente a Monai y posteriormente a Aonae [2]. La amplitud máxima registrada fue de 31,7m en la isla de Okushiri [3]. En la Figura 2.1 se muestran las alturas registradas a lo largo del valle.

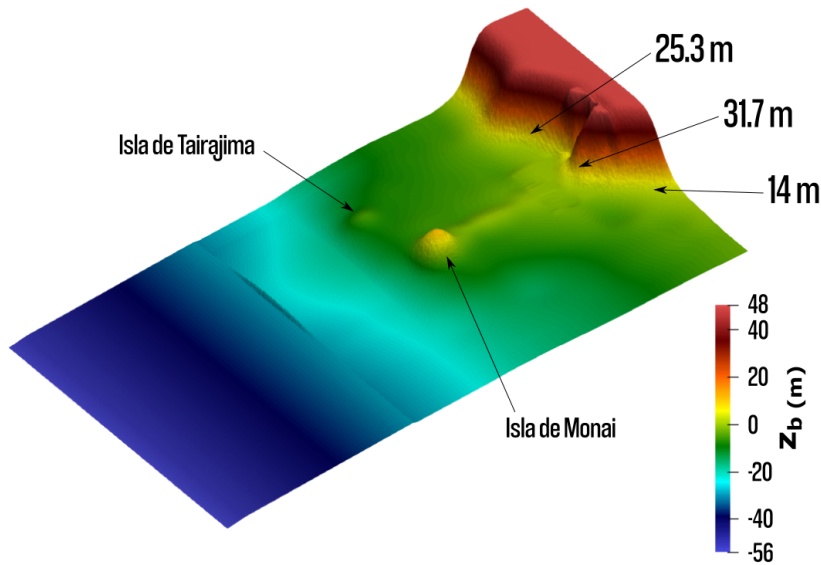
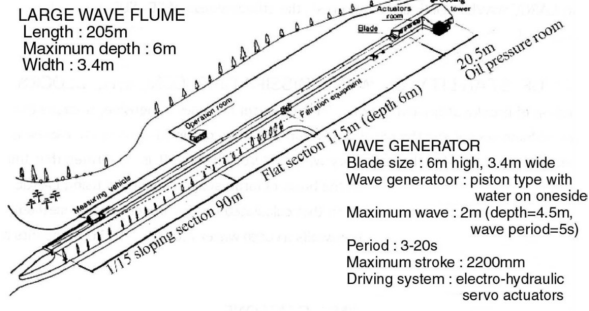
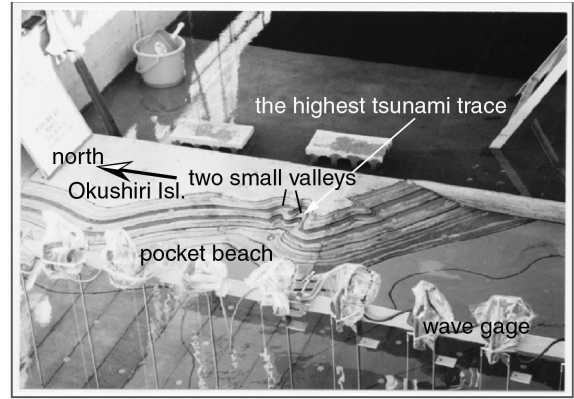


Figura 2.1: Representación tridimensional de la topografía de estudio ( $z_b$ ) junto con las alturas máximas registradas de las olas a lo largo del valle de Monai.

El *Central Research Institute of Electric Power Industry* (CRIEPI), Abiko (Japón), financió un experimento sobre este tsunami con el objetivo de estudiar la altura máxima del agua que se materializó en grandes olas. Este estudio se presentó en el congreso *The Second International Workshop on Long-Wave Runup Models* [12]. Mediante este modelo se reprodujo en un gran canal de oleaje el tsunami en la playa de Monai. El canal utilizado tenía unas dimensiones de 3,4m de ancho, 205m de largo y 4m de profundidad. En la Figura 2.2 se muestra el canal donde se realizó el experimento y las sondas colocadas para realizar las mediciones necesarias. La Figura 2.3 muestra con más detalle la posición de las seis sondas de medición que se emplearán como referencia en este trabajo para la comparación con los resultados numéricos. La generación de olas se realizó con una pala de tipo pistón. El resultado del experimento indicó que en el valle sur de Monai la altura máxima superó los 30 metros, producto de la primera gran ola que se estrelló contra la playa de bolsillo y el valle adyacente y el valor medio de las alturas rondaba los 24 metros. El experimento contaba con instrumentos de grabación digitales de alta velocidad y velocidad en tiempo real situadas en distintas posiciones [3].



(a) Canal de olas del experimento realizado por CRIEPI [3].



(b) Sondas de medición.

Figura 2.2: Experimento CRIEPI.

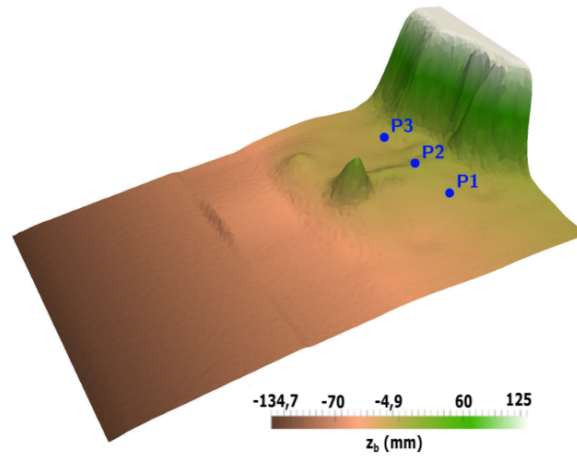


Figura 2.3: Representación tridimensional de la topografía del modelo a escala y posición de las sondas de medida del nivel de agua.

La Figura 2.4 muestra la condición de contorno de entrada, definida como el nivel de agua en el mar ( $wse = h + z_b$ ) en función del tiempo. Se observa que la onda comienza a los 7,5s aproximadamente y tiene su pico mayor a los 12,5s y el menor a los 20s aproximadamente.

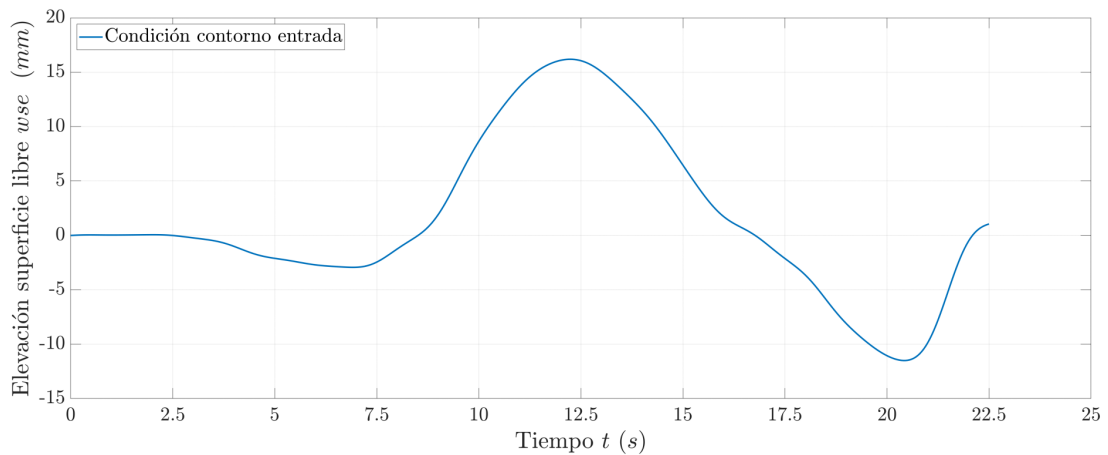


Figura 2.4: Condición de contorno a la entrada.

En la Figura 2.5 se muestran las medidas de la elevación de la superficie libre respecto al tiempo. Se observa que el tiempo de llegada de la onda es de 14s aproximadamente. Estos datos se utilizan en este trabajo para comparar resultados obtenidos mediante diferentes modelos computacionales.

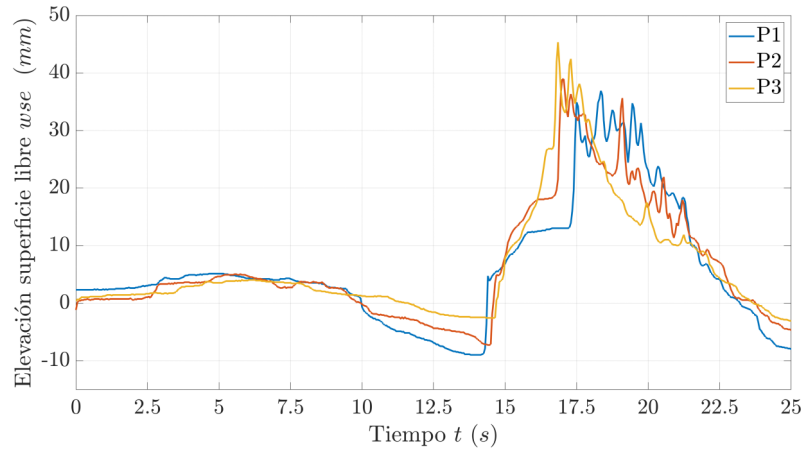


Figura 2.5: Datos experimentales de las sondas  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ . Obtenidos por CRIEPI.

# Capítulo 3

## Modelo matemático

---

En este capítulo se presentan las ecuaciones que determinan el comportamiento del flujo de superficie libre. En primer lugar, se formulan las ecuaciones en tres dimensiones a partir del método *Volume of Fluid* (VOF) y, posteriormente, las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas o *Shallow Water Equations* (SWE), a partir de las ecuaciones anteriores.

### 3.1. Formulación 3D: Volume of Fluid (VOF)

Ansys Fluent es un software de simulación numérica 3D de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) [7]. A continuación, se van a introducir las ecuaciones necesarias para la caracterización del movimiento fluido y su evolución en el tiempo para el caso de una onda de tsunami que se propaga cerca de la zona costera.

El dominio de estudio está formado por dos fases fluidicas, aire y agua, por lo que estarán presentes las complejidades características de un flujo multifásico de dos fluidos incompresibles e inmiscibles. El cálculo numérico de flujos multifásicos se puede formular mediante dos aproximaciones. La aproximación Euler-Lagrange considera una fase continua del fluido primario que actúa como matriz y una fase dispersa compuesta por partículas, burbujas o gotas de otros fluidos mezclada con la matriz. Por otro lado, la aproximación Euler-Euler trata a cada una de las fases independientemente, es decir, cada una de las fases tiene asociada una fracción de volumen  $\alpha$  en cada punto del dominio [7]. En este trabajo, el problema de estudio se modela mediante la aproximación Euler-Euler de volumen fluido (VOF).

La Figura 3.1 muestra un volumen de control 3D genérico aplicable al caso de estudio en el sistema de coordenadas cartesianas  $(x, y, z)$ . En cada punto del dominio 3D, se pueden definir las variables globales densidad  $\rho$  y viscosidad  $\mu$  como:

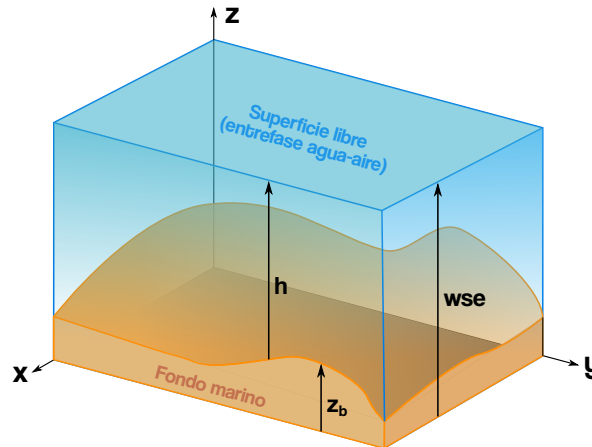


Figura 3.1: Variables características del dominio 3D (Calado  $h$ , nivel de fondo  $z_b$  y nivel superficial  $wse$ ).

$$\begin{aligned}\rho &= \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \\ \mu &= \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2\end{aligned}\tag{3.1}$$

donde  $0 < \alpha_2 < 1$  representa la fracción de volumen de la fase agua (fase secundaria) y  $0 < \alpha_1 < 1$  la fracción de volumen de la fase aire (fase primaria). La zona de mayor relevancia es la superficie libre, dado que es donde se produce y viaja la onda del tsunami. Para el caso de flujos superficiales, la superficie libre se define como los puntos en los que se cumple  $\alpha_2 = \alpha_1 = 0,5$ . Para puntos situados debajo de la superficie libre, la fracción agua será mayor que la fracción aire ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ). En los puntos situados por encima de la superficie libre la fracción agua será menor que la fracción aire ( $\alpha_2 < \alpha_1$ ). La suma de las fracciones de agua y aire en cada punto del dominio 3D debe ser igual a la unidad.

La caracterización de un flujo a lo largo del tiempo queda definida mediante las ecuaciones de continuidad y conservación de la cantidad de movimiento. La ecuación de continuidad hace referencia al principio de conservación de la masa. Bajo la hipótesis de que las fases agua y aire son incompresibles independientemente ( $\rho_2 = \text{cte}$  y  $\rho_1 = \text{cte}$ ), la ecuación de continuidad para la fase agua en el método VOF puede escribirse como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2) + \nabla \cdot (\alpha_2 \rho_2 \mathbf{v}_2) = 0\tag{3.2}$$

siendo  $\mathbf{v}_2$  el vector de velocidad de la fase agua. La fracción de volumen de la fase aire puede calcularse como  $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$  en cada punto del dominio tridimensional.

Por otro lado, en el método VOF empleado en este trabajo, el vector de velocidad en cada punto del dominio 3D es el mismo para ambas fases, es decir:

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_1 = \mathbf{v} = (u, v, w)\tag{3.3}$$

permitiendo escribir la ecuación de conservación de cantidad de movimiento como:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v})}_{\text{Variación temporal de momento}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v})}_{\text{Transporte convectivo de momento}} = \underbrace{-\nabla p}_{\text{Fuerzas de presión}} + \underbrace{\nabla \cdot (\nabla \bar{\tau})}_{\text{Fuerzas esfuerzos viscosos}} + \underbrace{\rho \mathbf{g}}_{\text{Fuerzas másicas}}\tag{3.4}$$

donde las fracciones de volumen de agua  $\alpha_2$  y aire  $\alpha_1$  participan a través de la densidad y la viscosidad global (3.1) en cada punto del dominio 3D. La aceleración de la gravedad  $\mathbf{g} = (0, 0, -g)$  está definida en la dirección vertical  $z$ .

La posición de la superficie libre ( $\alpha_2 = \alpha_1 = 0,5$ ) en la coordenada vertical  $z$  se define con la variable  $wse(x, y)$  para cada punto  $(x, y)$ . Por tanto, si la coordenada vertical del lecho marino se define como  $z_b(x, y)$  para cada punto  $(x, y)$ , la profundidad del flujo de agua para el método VOF puede establecerse como:

$$h(x, y) = wse(x, y) - z_b(x, y)\tag{3.5}$$

## 3.2. Formulación 2D: Shallow Water Equations (SWE)

RiverFlow2D [8] utiliza las ecuaciones bidimensionales de aguas poco-profundas o *Shallow Water Equations* (SWE). Este modelo 2D simplificado se obtiene promediando las ecuaciones de continuidad y conservación de cantidad de movimiento (ecuaciones de Navier-Stokes) para la fase agua a lo largo de la dirección vertical  $z$ . La aproximación de aguas poco-profundas se basa en la hipótesis de que las dimensiones horizontales  $(x, y)$  del flujo son mucho mayores que la profundidad del flujo en la dirección  $z$ . La Figura 3.2 muestra los parámetros de altura en el caso de estudio en el sistema de coordenadas cartesianas  $(x, z)$ . Esta hipótesis permite establecer que la variación de presión a lo largo la columna de flujo sigue una distribución hidrostática. Además es necesario imponer condiciones contorno dinámicas y cinemáticas en el fondo marino  $z_b(x, y)$  y la superficie libre  $wse(x, y)$ .

Imponiendo estas hipótesis y condiciones, las ecuaciones 2D de conservación de masa y cantidad de movimiento para el flujo de agua pueden escribirse como:



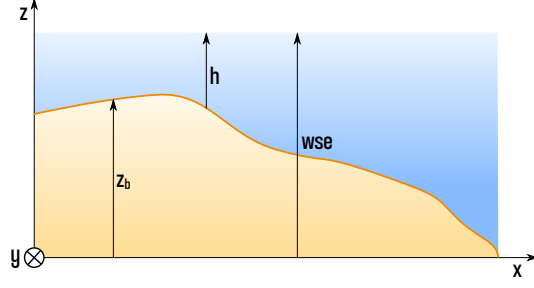


Figura 3.2: Variables características del dominio 2D (Calado  $h$ , nivel de fondo  $z_b$  y nivel superficial  $wse$ ).

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}h)}{\partial y} &= 0 \\
 \frac{\partial \bar{u}h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{u}^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{u}\bar{v}h) &= -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - gh S_{fx} \\
 \frac{\partial \bar{v}h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\bar{v}h) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v}^2 h + \frac{1}{2} g h^2 \right) &= -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - gh S_{fy}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

donde  $h$  es la profundidad del flujo de agua en cada punto  $(x, y)$ ,  $\bar{u}$  y  $\bar{v}$  son las velocidades horizontales promediadas en la columna de flujo y  $\frac{\partial z_b}{\partial x}$  y  $\frac{\partial z_b}{\partial y}$  representan las pendientes del fondo en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente. Finalmente,  $S_{fx}$  y  $S_{fy}$  representan los términos por disipación turbulenta de momento por fricción con el fondo marino, modelados usando las relaciones:

$$S_{fx} = \frac{n^2 \bar{u} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{4/3}} \quad S_{fy} = \frac{n^2 \bar{v} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}}{h^{4/3}} \tag{3.7}$$

siendo  $n$  el coeficiente de rugosidad de Manning del fondo marino.

El sistema bidimensional de ecuaciones (3.6) puede ser reescrito de forma vectorial como:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{U}) = \mathbf{S}_b(\mathbf{U}) + \mathbf{S}_f(\mathbf{U}) \tag{3.8}$$

donde  $\mathbf{U}$  es el vector de variables conservativas:

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h, & h\bar{u}, & h\bar{v} \end{pmatrix}^T \tag{3.9}$$

y  $\mathbf{E}(\mathbf{U}) = (\mathbf{F}(\mathbf{U}), \mathbf{G}(\mathbf{U}))$  es la matriz de flujos conservativos a lo largo de las direcciones horizontales  $(x, y)$ , respectivamente:

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} h\bar{u} \\ h\bar{u}^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ h\bar{u}\bar{v} \end{pmatrix} \quad \mathbf{G}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} h\bar{v} \\ h\bar{u}\bar{v} \\ h\bar{v}^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix} \tag{3.10}$$

El vector  $\mathbf{S}_b(\mathbf{U})$  representa la aceleración del flujo causada por la pendiente del fondo, mientras que el vector  $\mathbf{S}_f(\mathbf{U})$  engloba la disipación de momento por el rozamiento con el fondo:

$$\mathbf{S}_b(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} \end{pmatrix} \quad \mathbf{S}_f(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} 0 \\ -gh S_{fx} \\ -gh S_{fy} \end{pmatrix} \tag{3.11}$$

Resulta conveniente definir la matriz jacobiana del sistema de ecuaciones (3.8) como [13]

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{U}) \cdot \mathbf{n}}{\partial \mathbf{U}} \tag{3.12}$$



# Capítulo 4

## Modelos computacionales

La generación de un modelo computacional en CFD consiste en representar el volumen de fluido mediante un conjunto de volúmenes finitos para resolver numéricamente una serie de ecuaciones. En el caso de estudio de este trabajo, se utiliza la topografía mostrada en la Figura 4.1, correspondiente al fondo marino situado en el valle de Monai, obtenida a partir de un modelo digital de terreno (MDT) con resolución de  $1,4\text{cm}$  [2]. En la Figura 4.1 también se muestran tres puntos en los que se registró experimentalmente el nivel de agua en función del tiempo ( $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ ), que se usarán para validar el modelo computacional, y tres puntos adicionales ( $P_4$ ,  $P_5$  y  $P_6$ ) que se emplearán para evaluar el comportamiento del modelo en puntos cercanos a la costa.

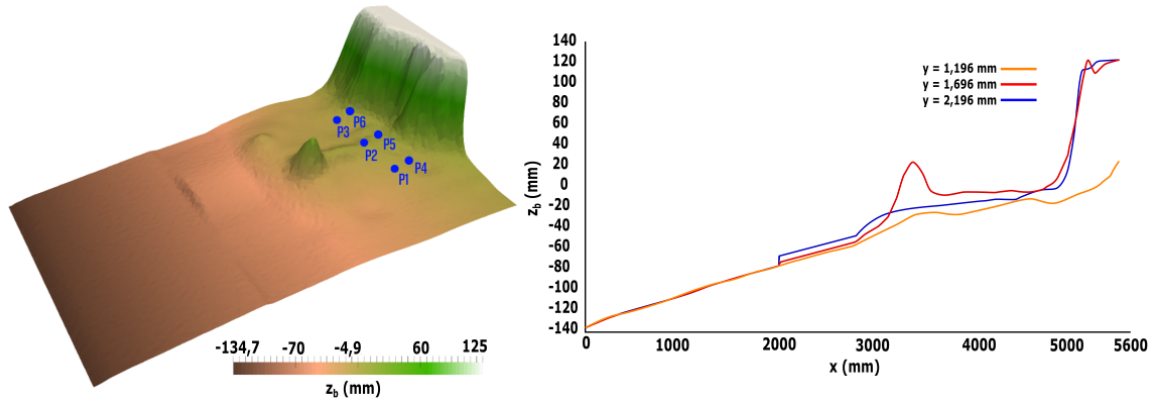


Figura 4.1: Perfiles topográficos y sondas analizadas.

En la Tabla 4.1 se muestran cada una de las localizaciones de las sondas colocadas en los modelos computacionales.

	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$
x (mm)	4,521	4,521	4,521	4,721	4,721	4,721
y (mm)	1,196	1,596	2,196	1,196	1,696	2,196

Tabla 4.1: Localización espacial de cada una de las sondas.

En este apartado, se va a explicar detalladamente la generación de los modelos computacionales tridimensional (Ansys Fluent) y bidimensional (RiverFlow2D) para el caso de estudio de este trabajo. En concreto, se detallará el tipo de malla, condiciones de contorno y los métodos necesarios para la resolución de las ecuaciones VOF y SWE.

## 4.1. Modelo tridimensional: Ansys Fluent

### 4.1.1. Mallado dominio 3D

Primeramente, se introduce la topografía del fondo marino a partir de los datos MDT dentro del programa y se modifica para la obtención del volumen de control a estudiar. Para realizar el mallado del dominio 3D, el primer paso consiste en realizar una discretización global utilizando un tamaño de elemento de  $20\text{cm}$  mediante una malla no estructurada compuesta por elementos tetraédricos. Estos elementos son los que mejor se adaptan a una geometría irregular, en este caso dada por las variaciones topográficas del fondo marino. En la Figura 4.2 se muestra el mallado del dominio 3D con un detalle del fondo marino. Los diferentes tamaños de celda sirven para capturar correctamente la topografía del fondo. En la franja central del dominio 3D se genera una zona rectangular que contiene elementos más finos (tamaño  $2\text{cm}$  aproximadamente) para capturar adecuadamente los cambios en la elevación de la superficie libre del mar y el desplazamiento de la onda de tsunami. En la realización de este modelo computacional se han utilizado 1.562.628 celdas para un mayor control de la superficie libre.

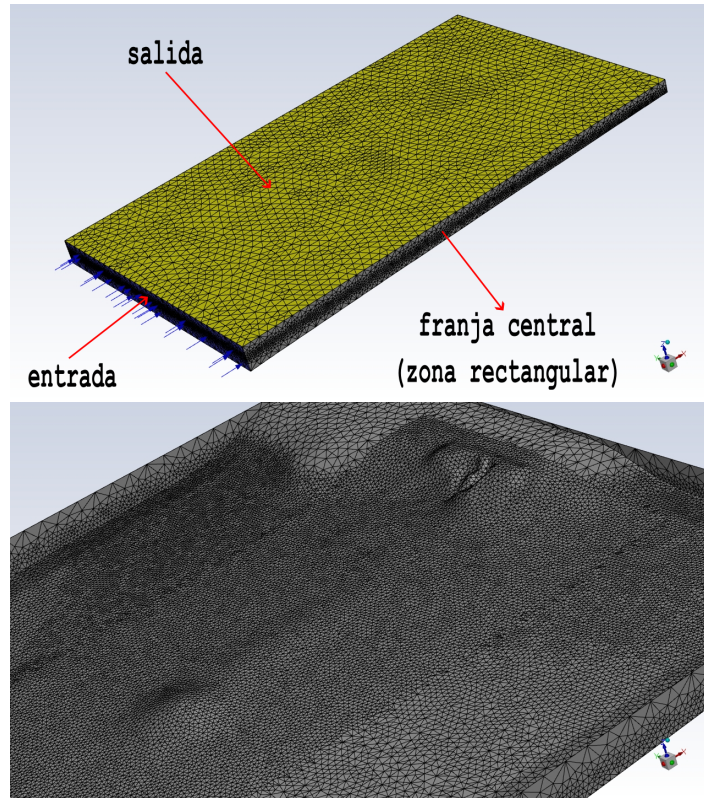


Figura 4.2: Mallado de la superficie libre y del fondo marino en Ansys.

### 4.1.2. Solución numérica de las ecuaciones tridimensionales

Para la resolución de la ecuación de conservación de la fracción de agua en el modelo VOF, el programa Ansys Fluent utiliza la formulación implícita:

$$\frac{\alpha_2^{n+1}\rho_2^{n+1} - \alpha_2^n\rho_2^n}{\Delta t}V + \sum_f \left( \rho_2^{n+1}U_f^{n+1}\alpha_{2,f}^{n+1} \right) = 0 \quad (4.1)$$

donde  $n$  es el índice del paso de tiempo actual,  $n+1$  es el índice del paso de tiempo siguiente,  $V$  es el volumen del elemento y  $U_f$  es el flujo volumétrico normal a través de la cara  $f$  del elemento.

Para la resolución numérica de las ecuaciones, Ansys Fluent permite utilizar tanto métodos explícitos como implícitos. Los primeros obtienen la solución de las variables hidráulicas a tiempo  $n + 1$  como una función de las mismas a tiempo  $n$ , mientras que los métodos implícitos se basan en la información en ambos niveles temporales, por lo que su resolución es más compleja. Por otro lado, los métodos implícitos cuentan con la ventaja de ser incondicionalmente estables, mientras que los explícitos requieren de una limitación en el paso temporal  $\Delta t$ , dada por:

$$\Delta t = \text{CFL} \frac{V}{\frac{1}{2} \sum_f \lambda_f^{\text{máx}} A_f} \quad (4.2)$$

donde el parámetro CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) controla la estabilidad del método y ha de tomar un valor inferior a 1,  $A_f$  es el área de la cara del elemento y  $\lambda_f^{\text{máx}}$  representa el valor máximo de los autovalores de la matriz jacobiana  $\mathbf{J}$  del sistema de ecuaciones (3.12).

#### 4.1.3. Condiciones de contorno

La definición de las condiciones de contorno permiten resolver a Ansys Fluent las ecuaciones que caracterizan el fluido en las fronteras del dominio 3D. Dichas condiciones de contorno son las siguientes:

- Velocidad y elevación de la superficie del agua en la cara de entrada del dominio 3D.
- Condiciones de no-deslizamiento  $u = v = w = 0$  entre el flujo y el fondo marino.
- Salida a presión atmosférica en la cara superior del dominio 3D.
- Condiciones de no-deslizamiento  $u = v = w = 0$  entre el flujo y las caras laterales.

#### 4.1.4. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales que definen el caso de estudio en 3D se toman a partir de un nivel  $wse = 0$  de superficie libre. Por encima de la superficie libre,  $\alpha_1 = 1$  y  $\alpha_2 = 0$ , en cambio, por debajo de la superficie libre,  $\alpha_1 = 0$  y  $\alpha_2 = 1$ .

## 4.2. Modelo bidimensional: RiverFlow2D

### 4.2.1. Mallado dominio 2D

El primer paso consiste en introducir el ráster de la topografía en RiverFlow2D. Cada celda del ráster contiene como dato la elevación del fondo marino. Posteriormente, Se realiza el mallado espacial del dominio 2D mediante elementos triangulares. A continuación, se muestrea la elevación promedio del fondo marino en cada uno de los elementos triangulares de la malla.

El tamaño de la celda de mallado es aproximadamente uniforme en todo el dominio, por lo que, como primer paso de modelado, se estudiará la dependencia de los resultados computacionales con el refinamiento de los elementos triangulares. La Figura 4.3 muestra una discretización del fondo marino con malla gruesa y con una malla refinada.

### 4.2.2. Solución numérica de las ecuaciones bidimensionales

Para la resolución modelo 2D con RiverFlow2D, del sistema de ecuaciones (3.8) se integra temporal y espacialmente en cada celda triangular del dominio y se utiliza un método explícito upwind de primer orden para su actualización en cada paso de tiempo:

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{NE} \mathbf{T}_k^{-1} \mathbf{F}_k^\downarrow l_k \quad (4.3)$$

donde  $\mathbf{U}_i$  es el vector de variables conservadas en la celda  $i$ ,  $A_i$  es el área de cada celda,  $\mathbf{T}_k^{-1}$  es la inversa de la matriz de rotación en el lado  $k$  de la celda,  $\mathbf{F}_k^\downarrow$  es el vector de flujos a través del lado  $k$  de la celda y  $l_k$  es la longitud del lado de la celda.

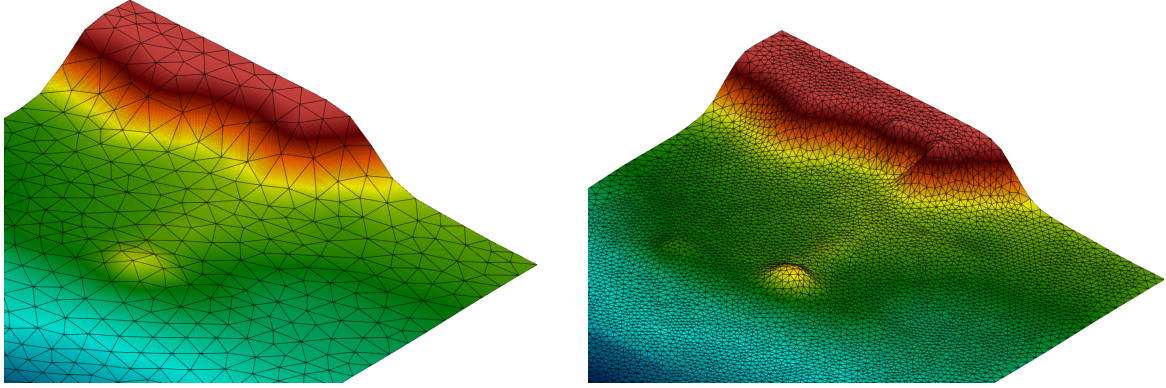


Figura 4.3: Mallado del dominio 2D. Malla gruesa (izquierda) y malla fina (derecha).

Al igual que en el modelo 3D, se utiliza una condición tipo CFL para limitar el paso de tiempo:

$$\Delta t \leq \text{CFL} \min \left( \frac{A_i}{l_k \lambda_k^{\max}} \right) \quad (4.4)$$

donde  $\lambda_k^{\max}$  es el máximo valor propio en el lado  $k$  de la celda. Al ser un método explícito, el factor CFL debe ser menor de 1.

#### 4.2.3. Condiciones de contorno e iniciales

RiverFlow2D requiere de condiciones de contorno para la resolución de las ecuaciones formuladas anteriormente. Dichas condiciones son las siguientes:

- Elevación de la superficie libre del agua a la entrada.
- El resto de contornos se encuentran cerrados.

Por otro lado, en el modelo 2D se toma como condición inicial que  $wse = 0$  y la velocidad inicial es nula en todo el dominio.

# Capítulo 5

## Resultados

---

### 5.1. Modelo 3D

En esta sección se van a mostrar los resultados obtenidos en 3D mediante el programa Ansys Fluent. En la Figura 5.1 se observa la velocidad a lo largo de la superficie libre para cierto instante de tiempo. El cambio de color en la zona próxima a la isla de Monai indica una variación de velocidad cuando la onda impacta con el islote.

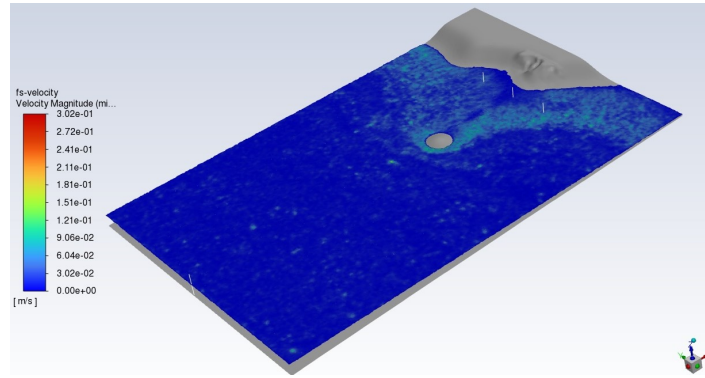


Figura 5.1: Velocidad en la superficie libre.

En la Figura 5.2 (izquierda) se muestra una gráfica de las residuales. Estos valores son una representación de la convergencia de cada una de las variables representadas minimizando el error. En la Figura 5.2 (derecha) se muestra la evolución del paso de tiempo a lo largo del tiempo simulado.

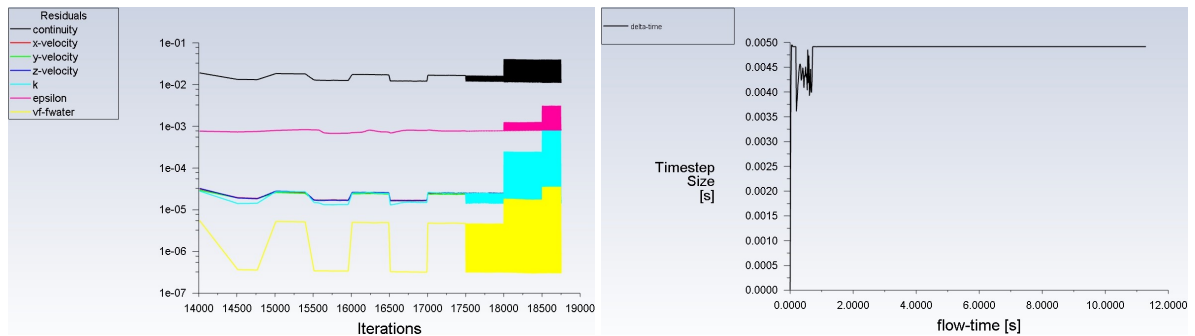


Figura 5.2: Residuales (izquierda) y paso de tiempo (derecha).

A continuación, en la Figura 5.3 (izquierda) se muestra una gráfica de los cambios de velocidad a la entrada a lo largo del tiempo. Posteriormente, en la Figura 5.3 (derecha) se muestra la condición de entrada al volumen de control, el nivel de agua en función del tiempo.

En la Figura 5.4 se observa como se captura el nivel de la superficie libre en la entrada y en las sondas experimentales.

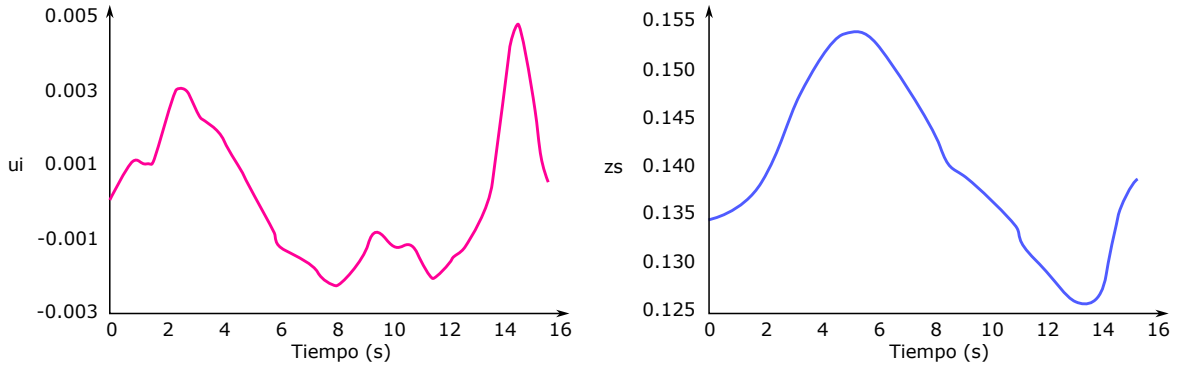


Figura 5.3: Velocidad a la entrada (izquierda) y elevación de la superficie libre a la entrada (derecha).

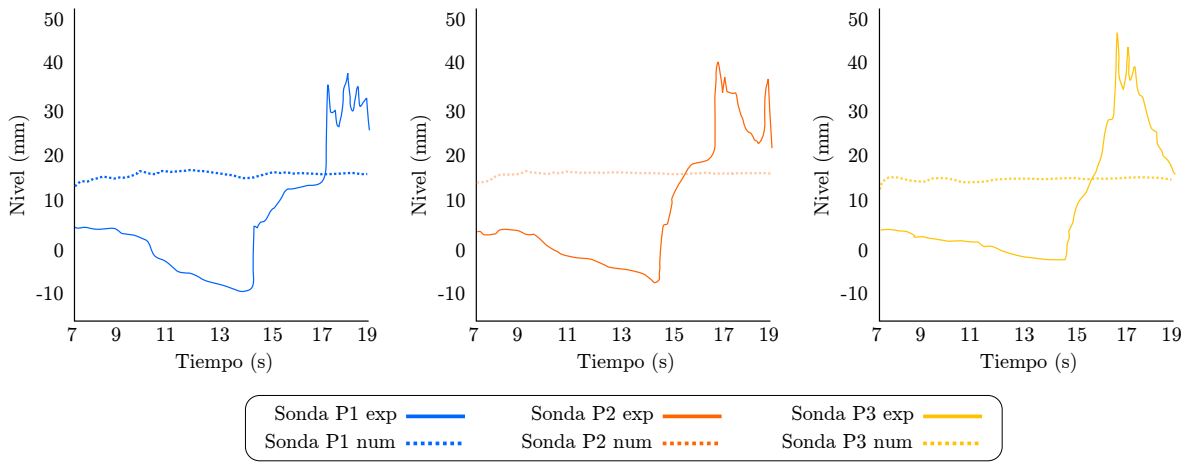


Figura 5.4: Elevación de la superficie del agua en las sondas  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  para el modelo 3D y comparación con las medidas experimentales.

Con el objetivo de economizar el tiempo de simulación, se ha considerado el instante inicial en  $t = 7s$ , que corresponde al tiempo de comienzo de la ola (ver Figura 2.4). Esta simulación ha supuesto un tiempo computacional de aproximadamente 2 días.

En la Figura 5.4 se compara la elevación de la superficie del agua obtenida por Fluent con los datos experimentales. A partir de los 7s, en los datos experimentales, la elevación de la superficie del agua asciende hasta aproximadamente los 12s y luego desciende con algunas variaciones en ambos casos. En cambio, en el caso de Fluent, tanto en la sonda a la entrada como en las sondas  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  se comportan de una manera muy diferente a los datos experimentales. Ni a la entrada ni en dichas sondas siguen un comportamiento similar.

El tiempo invertido y los resultados conseguidos indican que hay que optar por realizar una simplificación del modelo a 2D porque no se ha conseguido capturar la superficie libre correctamente. Para reducir los tiempos computacionales y obtener unos resultados que ayuden a comparar los datos experimentales con los obtenidos mediante los modelos computacionales.

## 5.2. Modelo 2D

En este apartado se realiza un estudio de los resultados obtenidos en las simulaciones 2D. Primeramente, se lleva a cabo un estudio de convergencia de malla. Se toma como referencia la malla computacional con menor tamaño de celda y se comparan los resultados junto con los tiempos computacionales totales para elegir la malla más adecuada para este estudio en 2D. Seguidamente, se analiza la relación de la elevación de la superficie libre con la velocidad. Posteriormente, se realiza un estudio de la influencia del término de fricción en los resultados



a partir de la malla elegida.

### 5.3. Estudio de convergencia de malla.

Para conocer la malla más adecuada para validar el modelo computacional se realiza un estudio de convergencia de malla. Para ello, se toma como referencia el tamaño del píxel del ráster ( $1,4cm$ ), es decir, un tamaño del lado de la celda menor a dicho ráster no proporciona mejores resultados, solo un aumento de los tiempos computacionales. Por lo tanto, el límite del tamaño del lado de la celda será de  $1,4cm$ . En primer lugar, se realizan 6 mallas con un coeficiente de fricción  $n = 0,01sm^{-1/3}$  para comparar los resultados obtenidas en las simulaciones respecto a los datos experimentales. Los datos de las mallas empleadas son los mostrados en la Tabla 5.1, a partir de un lado de celda de  $20cm$  se va reduciendo paulatinamente dicho lado a la mitad hasta un lado máximo de  $1,25cm$ .

Malla	Número de elementos	Máximo lado de la celda	Mínimo lado de la celda
0	1.218	0,2	0,2
1	4.906	0,1	0,1
2	14.529	0,1	0,05
3	58.337	0,05	0,025
4	233.073	0,025	0,0125
5	699.950	0,0125	0,0075

Tabla 5.1: Modelos computacionales.

Para realizar este estudio, se utiliza el error medio cuadrático ( $RMSE$ ), el cual mide el error promedio de una variable respecto a la referencia elegida y se formula como

$$RMSE_k = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i=0}^4 (wse_{ref} - wse_i)^2} \quad (5.1)$$

con,

- $RMSE_k$ :  $RMSE$  para cada una de las sondas.
- $N_t$ : número total de valores de tiempos utilizados.
- $i$ : número de malla.
- $k$ : número de sonda.
- $wse_{ref}$ : elevación de la superficie del agua de los datos experimentales.
- $wse_i$ : elevación de la superficie del agua de cada una de las mallas.

Se toma de referencia la malla 5 porque tiene el mayor número de elementos y, luego, se compara la elevación de la superficie libre de referencia (experimento) respecto a cada una de las sondas de medición simuladas en las mismas coordenadas.

En la Figura 5.5 se muestra una comparación de los datos obtenidos mediante las 6 mallas y los datos experimentales. Entre los 15 y los 23 segundos se generan un mayor número de picos en la onda, por ello, se amplía la zona para una mayor observación. Como primera aproximación, se aprecia que la malla 0 se desvía mucho de los datos experimentales, respecto al resto de mallas. Además, los resultados que se obtienen con las mallas 3, 4 y 5 son similares.

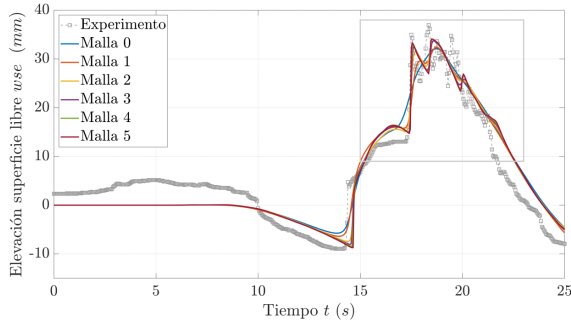
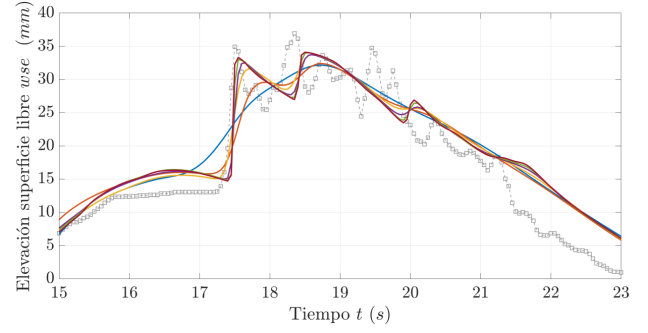
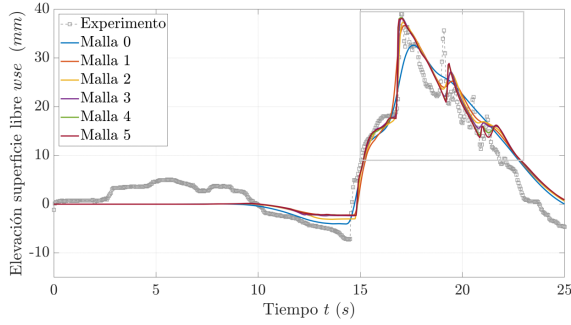
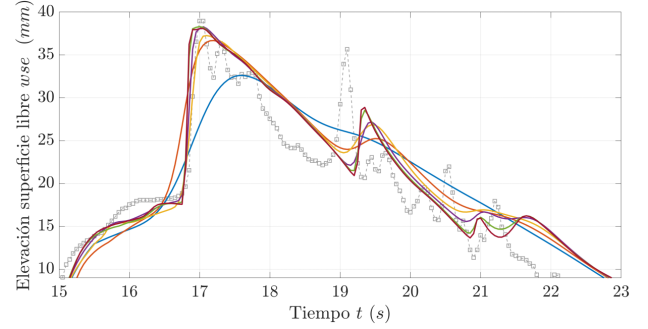
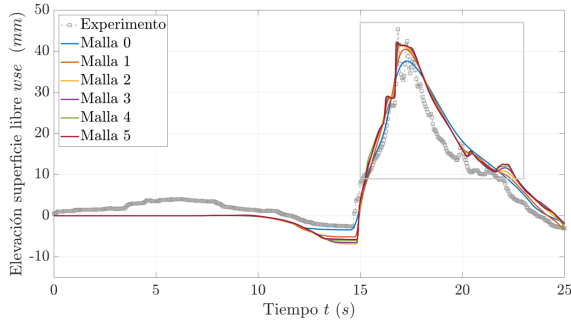
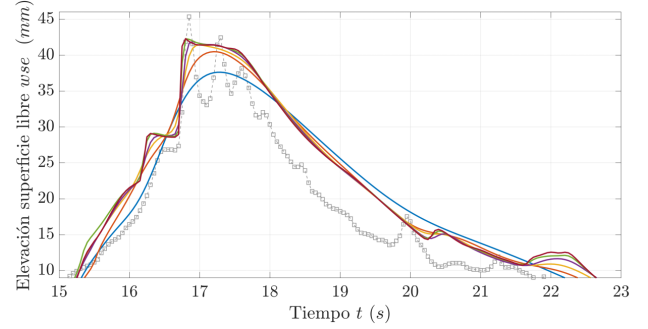
(a) Sonda  $P_1$ .(b) Sonda  $P_1$  en  $t = 15 - 23s$ .(c) Sonda  $P_2$ .(d) Sonda  $P_2$  en  $t = 15 - 23s$ .(e) Sonda  $P_3$ .(f) Sonda  $P_3$  en  $t = 15 - 23s$ .

Figura 5.5: Estudio de convergencia de malla. Comparación con datos experimentales.

En la Figura 5.6 se observan las tres sondas más cercanas a la costa ( $P_4$ ,  $P_5$  y  $P_6$ ), donde se aprecia que la malla 3 dista mucho de los resultados de  $wse$  obtenidos por las mallas 4 y 5. Consecuentemente, en las zonas más próximas a la costa, un mayor refinamiento de malla proporciona mejores resultados.

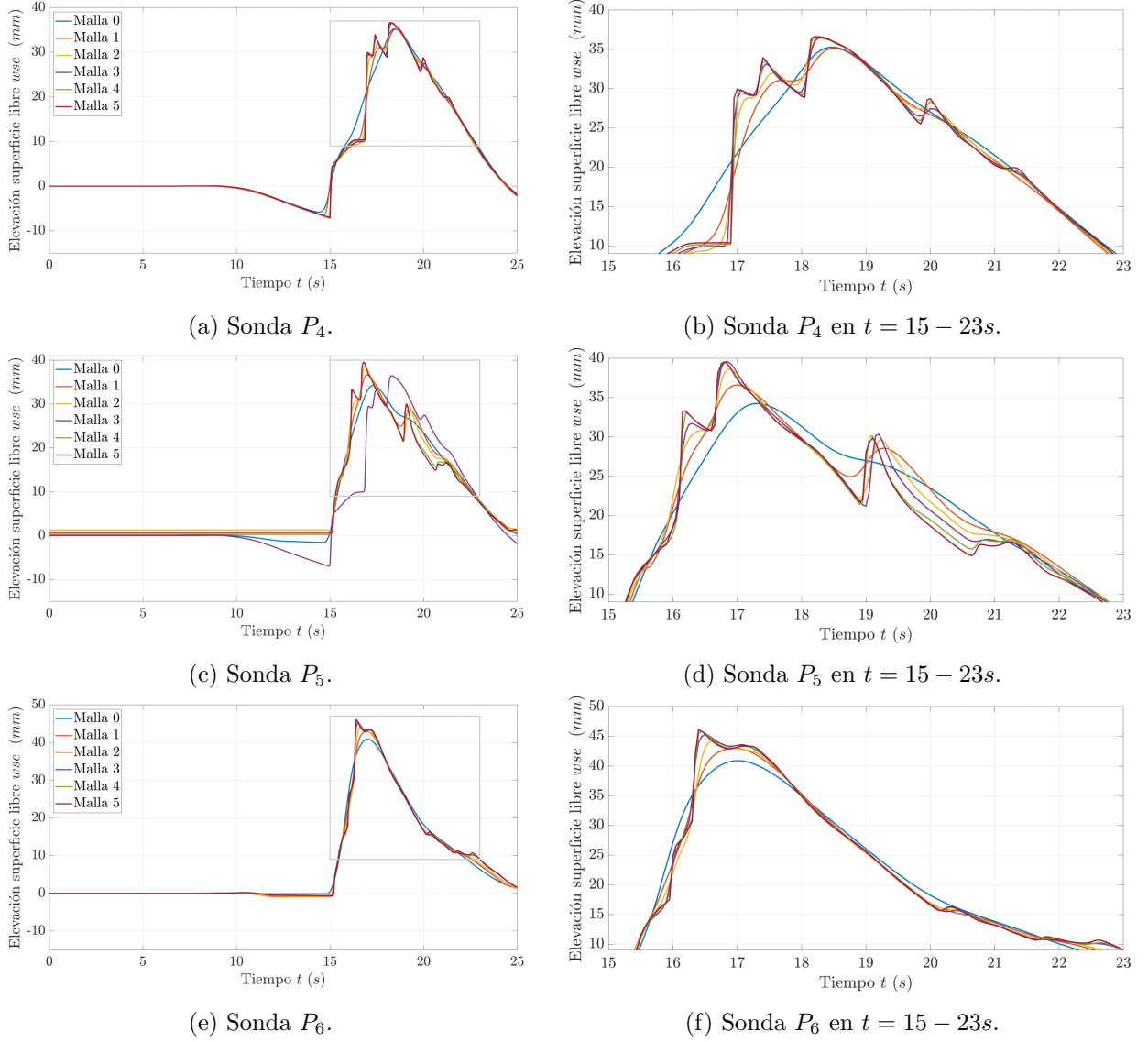


Figura 5.6: Estudio de convergencia de malla.

A continuación, se recogen en una tabla cada uno de los  $RMSE_k$  obtenidos para cada una de las mallas. En la Tabla 5.2 se aprecia que el  $RMSE$  va disminuyendo conforme aumenta el número de elementos. Por otro lado, en la Tabla 5.3, también se aprecia que se incrementan los tiempos computacionales a medida que se refina la malla de cálculo.

Malla	$RMSE_1(mm)$	$RMSE_2(mm)$	$RMSE_3(mm)$	$RMSE_4(mm)$	$RMSE_5(mm)$	$RMSE_6(mm)$
0	1,9784	2,4472	2,1698	2,2046	2,6437	1,8389
1	1,8038	1,4640	1,3096	1,5547	1,8727	1,2181
2	0,9815	1,2067	0,7858	0,9061	1,4159	0,8974
3	0,7283	0,7216	0,5569	0,5984	0,9987	0,3857
4	0,3754	0,2302	0,3039	0,4845	0,3649	0,1585
5	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.2:  $RMSE$  de cada una de las mallas simuladas.

Posteriormente, se representa en la Figura 5.7a como varían los tiempos computacionales en función del número de celdas de la malla y en la Figura 5.7 se representa la variación del  $RMSE$  respecto a la malla de referencia (malla 5).

En vista de las gráficas mostradas en la Figura 5.7 se elige la malla 4 porque el tiempo de simulación en GPU es de aproximadamente 1 minuto y el error medio cuadrático es muy próximo a 0.

Malla	Tiempo de simulación CPU	Tiempo de simulación GPU
0	15,54s	0,53s
1	43,01s	1,10s
2	1 minuto y 9 segundos	2,60s
3	3 minutos	11,94s
4	13 minutos y 58 segundos	1 minuto y 13 segundos
5	32 minutos y 7 segundos	5 minutos y 58 segundos

Tabla 5.3: Tiempos computacionales de cada una de las mallas simuladas.

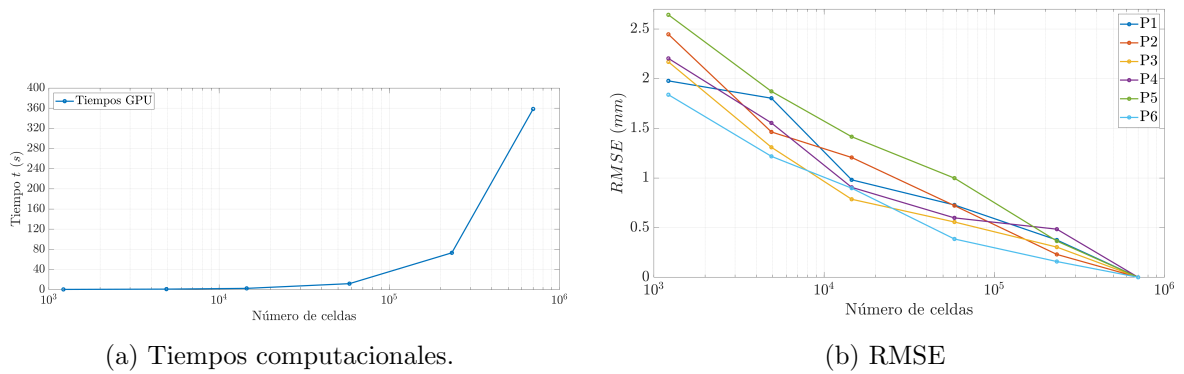
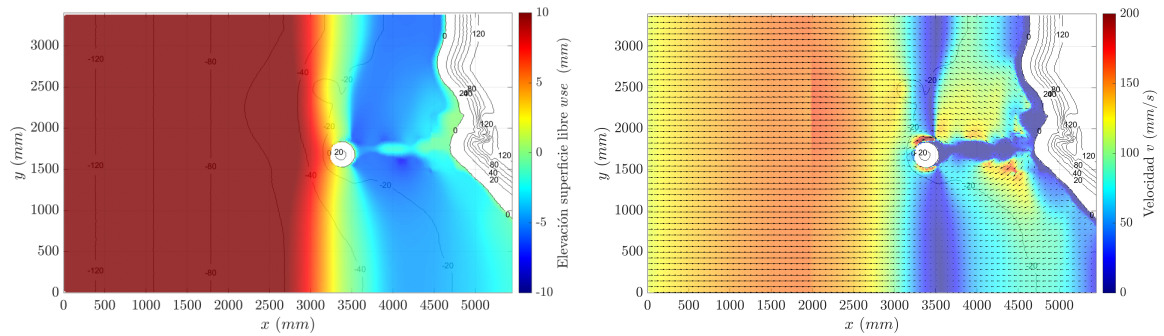


Figura 5.7: Gráficas del estudio de convergencia de malla.

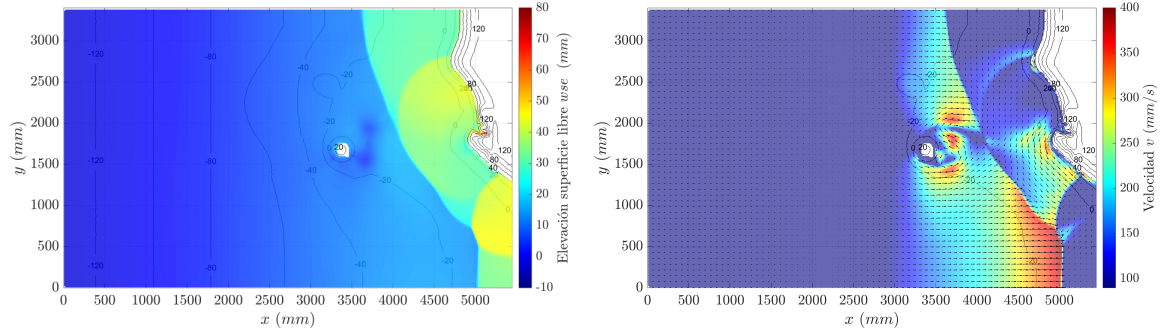
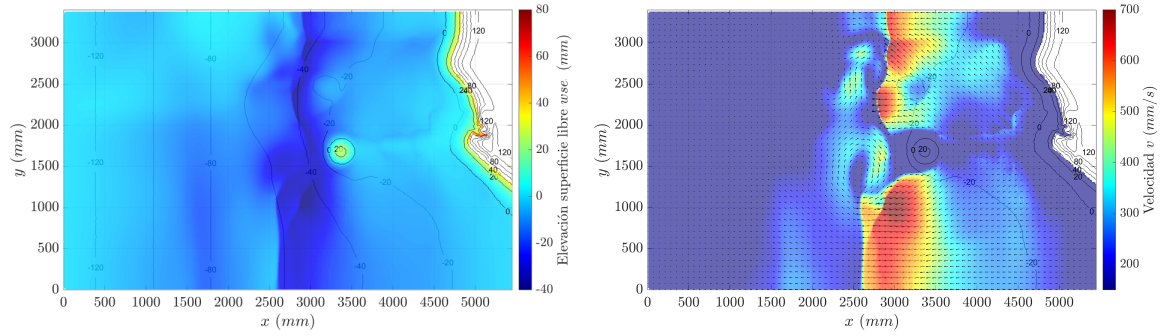
#### 5.4. Relación de la elevación de la superficie libre con la velocidad

En la Figura 5.8 se observa la relación de la elevación de la superficie del agua con su velocidad para diferentes tiempos. En  $t = 12,5s$  la onda impacta con la isla de Monai y se alcanzan en dicha isla valores bastantes más elevados de velocidad ( $0,2 - 0,250 m/s$ ) que antes de impactar la onda.

Figura 5.8:  $wse$  en  $t = 12,5s$  (izquierda) y  $v$  en  $t = 12,5s$  (derecha)

Otro momento a destacar es cuando la ola impacta contra el valle de Monai, Figura 5.9, la elevación de la superficie del agua es 5 veces mayor en algunas zonas mientras que las velocidades no aumentan tanto.

Conforme la onda se aleja de la costa, la elevación de la superficie del agua va disminuyendo, pero las velocidades aumentan considerablemente cuando la onda ya ha impactado bruscamente contra la costa (Figura 5.10). Estas relaciones de la  $wse$  y  $v$  se deben a la ecuación (2.3), explicada anteriormente, es un comportamiento de las ondas en aguas poco profundas.

Figura 5.9:  $wse$  en  $t = 17,5s$  (izquierda) y  $v$  en  $t = 17,5s$  (derecha).Figura 5.10:  $wse$  en  $t = 25s$  (izquierda) y  $v$  en  $t = 25s$  (derecha).

## 5.5. Estudio de influencia del término de fricción

A la hora de realizar métodos numéricos es muy importante tener en cuenta como afectan los diferentes parámetros a los resultados. Por ello, es importante ver que efecto tiene la variación del término de fricción según cuán alejado de la costa se está midiendo.

En primer lugar, utilizando la malla elegida en el apartado anterior (malla 4), se analiza el efecto que tiene un aumento o disminución del número de Manning a la hora de obtener unos resultados y compararlos con los datos experimentales. El rango de variación del número de Manning que se ha tomado es el mostrado en la Figura 5.11, se aumenta progresivamente  $n$  desde  $0,001sm^{-1/3}$  hasta  $0,04sm^{-1/3}$ . Se observa que un aumento del número de Manning a  $0,02sm^{-1/3}$  ó  $0,04sm^{-1/3}$  se consiguen peores resultados.

La representación gráfica no es suficiente para determinar el término de fricción más adecuado. Por esta razón, se realiza un estudio del  $RMSE$  tomando de referencia los datos del experimento. En la tabla 5.4, se muestran los  $RMSE_k$  para las sondas 1, 2 y 3.

$n (sm^{-1/3})$	$RMSE_1(mm)$	$RMSE_2(mm)$	$RMSE_3(mm)$
0,001	3,91	4,17	4,20
0,005	3,89	4,07	4,10
0,01	4,01	3,91	3,89
0,02	4,32	4,29	4,12
0,04	5,83	6,39	6,13

Tabla 5.4: Errores  $RMSE$  para cada uno de los coeficientes de rugosidad de Manning ensayados.

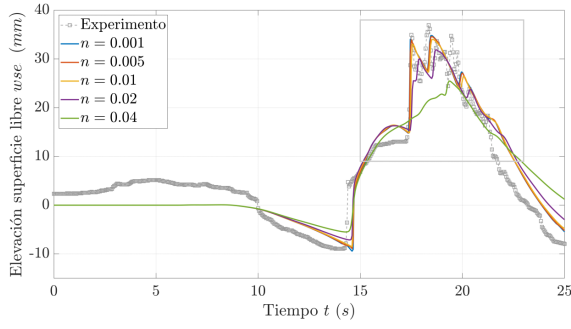
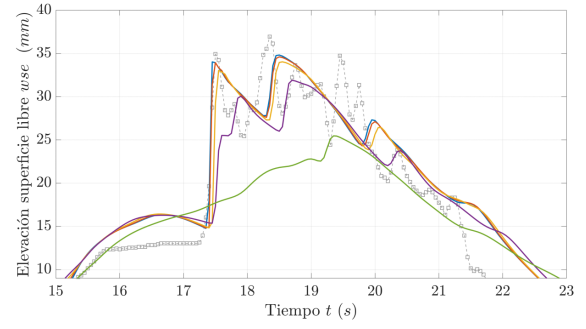
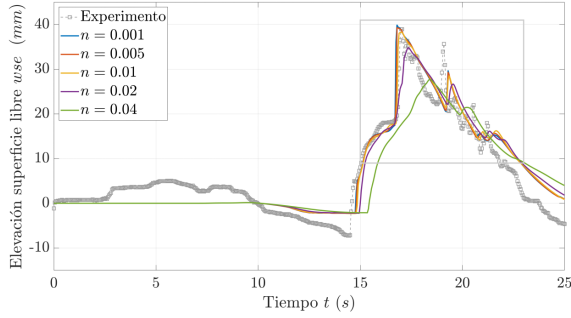
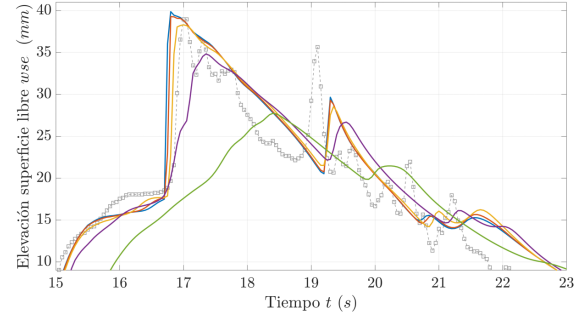
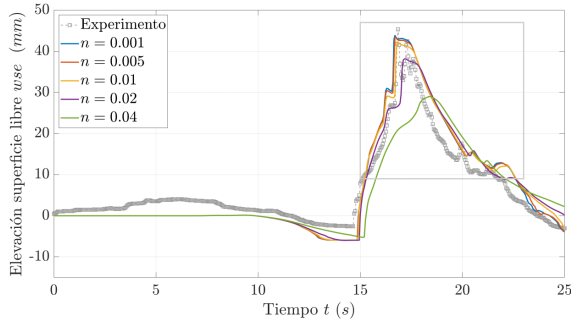
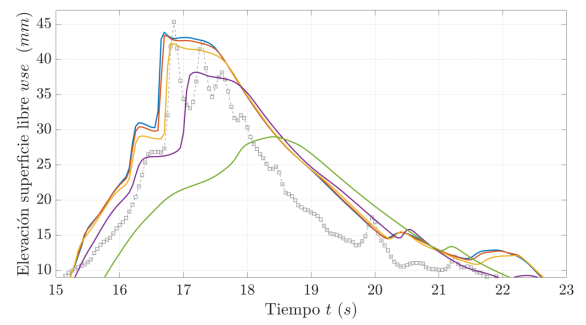
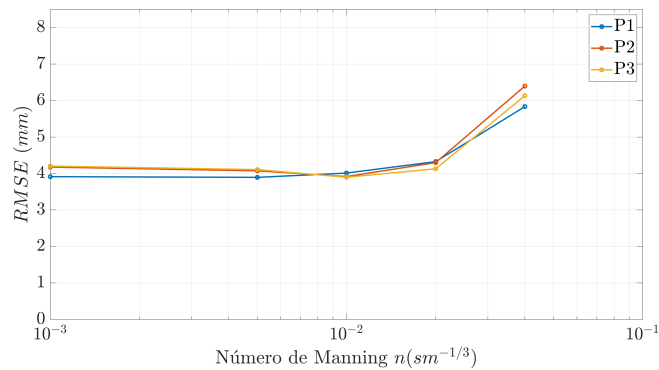
(a) Sonda  $P_1$ .(b) Sonda  $P_1$  en  $t = 15 - 23s$ .(c) Sonda  $P_2$ .(d) Sonda  $P_2$  en  $t = 15 - 23s$ .(e) Sonda  $P_3$ .(f) Sonda  $P_3$  en  $t = 15 - 23s$ .

Figura 5.11: Variación del término de fricción y comparación con datos experimentales.

A continuación, se representan los valores de la Tabla 5.4 gráficamente en la Figura 5.12. Se observa que el error permanece prácticamente constante hasta  $n = 0,01sm^{-1/3}$ . A partir de dicho valor el error va aumentando cada vez más.

Figura 5.12:  $RMSE$  - Estudio del término de fricción.

Seguidamente, se analiza la influencia del número de Manning en las sondas más cercanas a la costa ( $P_4$ ,  $P_5$  y  $P_6$ ). En este caso, la influencia del número de Manning es mayor y una reducción de este proporciona unos mejores resultados. De todas formas, los resultados obtenidos con un  $n = 0,01sm^{-1/3}$  son suficientemente buenos y permiten comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante métodos numéricos.

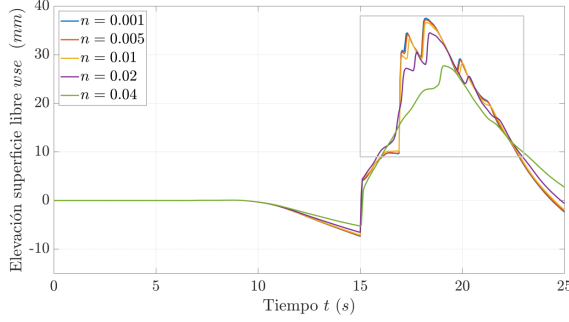
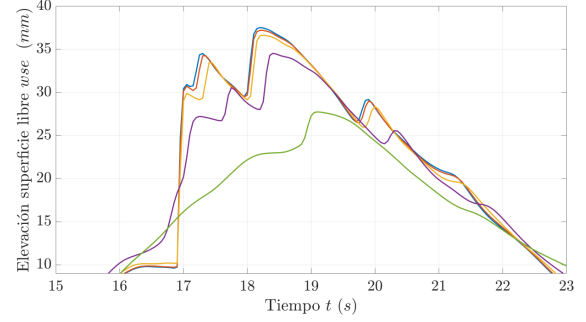
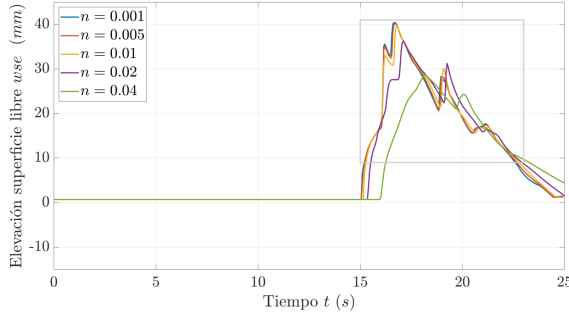
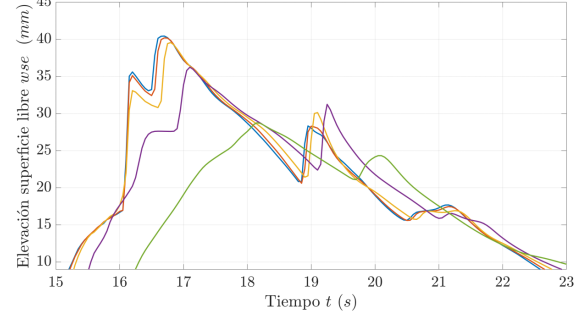
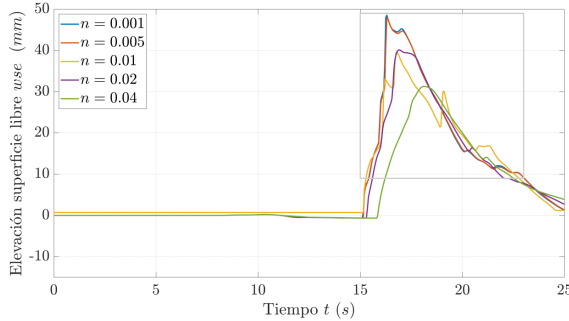
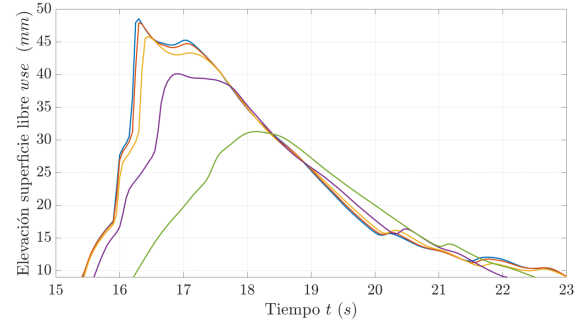
(a) Sonda  $P_4$ .(b) Sonda  $P_4$  en  $t = 15 - 23s$ .(c) Sonda  $P_5$ .(d) Sonda  $P_5$  en  $t = 15 - 23s$ .(e) Sonda  $P_6$ .(f) Sonda  $P_6$  en  $t = 15 - 23s$ .

Figura 5.13: Estudio de influencia del término de fricción.





# Capítulo 6

## Conclusiones

---

Este trabajo ha consistido en un estudio del comportamiento del tsunami ocurrido el 12 de julio de 1993 en el valle de Monai a través de dos herramientas computacionales: Ansys Fluent (3D) y RiverFlow2D (2D). En el caso 2D, adicionalmente se ha realizado un estudio de convergencia de malla mediante el uso del error cuadrático medio (*RMSE*) y, a partir de la malla elegida, se ha analizado la influencia del término de fricción en los resultados y su efecto en zonas más próximas a la costa. La comparación de los resultados numéricos con las medidas del experimento a escala de laboratorio del mismo caso ha permitido validar los modelos.

El estudio de convergencia de malla se ha realizado mediante el análisis del error medio cuadrático y los tiempos de simulación de cada modelo computacional según el número de elementos. Dicho estudio ha concluido con la elección de una malla de 233.073 celdas y 2,5cm de lado máximo de elemento donde el tiempo de simulación en GPU ha sido de 1 minuto y 13 segundos y el error cometido es prácticamente nulo. Por otro lado, el estudio de la influencia del término de fricción determina que el rango adecuado para el coeficiente de rugosidad de Manning es  $[0,001 - 0,01]sm^{-1/3}$ . Para un número de Manning mayor que  $0,01sm^{-1/3}$  el error va aumentando considerablemente. Debido a que el error en dicho rango no varía mucho, se considera adecuado un término de fricción de  $n = 0,01sm^{-1/3}$  para comparar los resultados con los datos experimentales.

Cabe destacar la semejanza entre los resultados en dos dimensiones y los obtenidos experimentalmente. Además, esta similitud permite obtener un modelo de predicción lo suficientemente bueno para crear planes de prevención frente a tsunamis en condiciones similares ya que el tiempo de simulación es muy corto, aproximadamente un minuto.

Como trabajo futuro, se podría plantear un estudio más completo sobre las situaciones específicas en este tipo de casos en las que resulte conveniente utilizar un modelo 3D. Por otro lado, se podrían realizar estudios numéricos alternativos con el modelo 2D que permitan incluir elementos mitigadores de la energía del tsunami (barreras, diques, etc), ya que la eficiencia de la implementación en GPU de este modelo permite realizar muchas simulaciones en un tiempo computacional reducido. De esta manera, se puede seguir optimizando este modelo para obtener mejores herramientas predictivas que permitan mejorar el diseño de medidas de protección y planes de evacuación.



# Capítulo 7

## Bibliografía

---

- [1] National Geographic. Tsunamis: Facts About Killer Waves. *National Geographic*, 01 2005.
- [2] Internacional Tsunami Information Center. Tsunami Devastates Japanese Coastal Region. [nctr.pmel.noaa.gov/okushiri\\_devastation.html](http://nctr.pmel.noaa.gov/okushiri_devastation.html).
- [3] M. Matsuyama and H. Tanaka. An experimental study of the highest run-up height in the 1993 Hokkaido Nansei-Oki earthquake tsunami. In *International Tsunami Symposium 2001*, volume 7, 08 2001.
- [4] R. Sunny, J. Horrillo, and W. Cheng. Tsunami3d benchmark results for 2017 nthmp tsunamigenic landslide model benchmarking workshop. *University of Delaware*, 07 2017.
- [5] Y. Oishi, F. Imamura, and D. Sugawara. Near-field tsunami inundation forecast using the parallel tunami-n2 model: Application to the 2011 tohoku-oki earthquake combined with source inversions. *Geophysical Research Letters*, 42(4):1083–1091, 2015.
- [6] Q. Liang, J. Hou, and R. Amouzgar. Simulation of tsunami propagation using adaptive cartesian grids. *Coastal Engineering Journal*, 57, 07 2015.
- [7] Ansys. *Fluent Theory Guide*, 2022.
- [8] Hydronia S.L. *RiverFlow2D Two-Dimensional Flood and River Dynamics Model*, 2022.
- [9] R. A. Serway and J. W. Jewett. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. Cengage Learning, 2013.
- [10] H. Mitsuyasu. A Historical Note on the Study of Ocean Surface Waves. *Journal of Oceanography*, 58:109–120, 2002.
- [11] P. K. Kundu and I. M. Cohen. *Fluid Mechanics*. Academic Press, 2008.
- [12] H. Yeh, P. Liu, and C. Synolakis. *Long-wave runup models*. World Scientific, 1995.
- [13] E.F. Toro. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics: A Practical Introduction*. Springer, 1999.