

Facultad de Tecnología de la Construcción

## **CÁLCULO DE LAS FUERZAS ACTUANTES EN ESTRUCTURAS RESISTENTES ANTE TSUNAMIS.**

Elaborado por:

Br. Norwin Ernesto  
Acosta Galeano  
Carnet: 2000-10101

Br. David Argenis  
Chamorro  
Carnet: 2013-61045

Tutor:

Msc. Ing. Wilfried Reinhard  
Klaus Strauch

Managua, Nicaragua. 3 de julio 2025

## **Dedicatoria**

Dedico este logro en primero lugar a Dios, porque creí que, por mi edad y problemas económicos, entre otras cosas que me limitaban, este logro no sería posible para mí. Pero me di cuenta que con Dios todo es posible.

También dedico este trabajo a mi madre Martha y a Doña Martina, que ya no están en este plano terrenal, pero estarían muy contentas y orgullosas de mi por este logro.

A mis amigos (Alex, Mel, Rebe, Colocho, Cint) que me apoyaron y creyeron en mí, que escucharon mis ideas, aportaron sus ideas opiniones y consejos, y me animaron a no rendirme. Y qué más puedo decir, gracias, amigos por hacerme creer en mí.

Br. Norwin Ernesto Acosta Galeano.

## **Dedicatoria.**

Dedico este logro primeramente a un Dios que siempre ha estado ayudándome a cumplir con este propósito, ha abierto mi mente y me ha ayudado aprender aún más y llegar a ser mejor cada día.

Dedico también este logro a mi mamita Isabel Avendaño que este año 2024 partió de esta vida y se con certeza que ella se siente orgullosa de esta meta cumplida y cuanto hubiese deseado que estuviera presente, Y también dedico este logro a mi madre Norma Nazarena Chamorro que siempre inculco en mi un deseo grande de ser un Ingeniero Civil para así lograr ser un profesional como un objetivo más en mi vida.

Gracias a mi compañero Norwin Acosta por el incondicional apoyo que me brindó y el trabajo arduo que hemos compartido juntos al preparar este trabajo monográfico.

Br. David Argenis Chamorro

## **Agradecimiento**

Primeramente, agradecer a Dios por darnos sabiduría y poner en nuestro camino a las personas indicadas que nos apoyaron en la realización de esta Monografía.

A nuestro Tutor, Msc. Wilfried Reinhard, por su paciencia y valiosos aportes y consejos para la realización de este trabajo; a todas las personas que gentilmente nos brindaron información; a los ingenieros especialistas del departamento de estructuras, por su apreciable apoyo para la realización de este trabajo. A nuestros amigos, seres queridos y todas las personas que de una u otra forma hicieron posible que este sueño se hiciera realidad.

Br. David Argenis Chamorro

Br. Norwin Ernesto Acosta Galeano.

## RESUMEN DEL TEMA

El 1 de septiembre 1992, a las 8:00 pm, un tsunami impactó la Costa Pacífico de Nicaragua causando la muerte de 170 personas, así como grandes daños a viviendas e infraestructura costera. Las olas alcanzaron alturas de entre 4 y 10 metros y arribaron a la costa en aproximadamente 40 minutos. Debido a su ubicación frente a la Costa Pacífico y su topografía predominantemente plana y próxima al nivel medio del mar, el casco urbano de Corinto está altamente expuesto al impacto de tsunamis. Adicionalmente, al haberse construido sobre un territorio insular y contar con una única vía de conexión terrestre con el resto del país (Puente Paso Caballos) las labores de evacuación y rescate podrían dificultarse ante un evento similar.

Una alternativa para reducir el riesgo sería la construcción de infraestructuras de mitigación resistentes a tsunamis. Sin embargo, la información disponible para el diseño de estas obras es limitada, ya que la mayoría de los códigos de diseño se enfocan en cargas sísmicas o cargas de viento. La presente monografía muestra la forma de como calcular las fuerzas actuantes en estructuras costeras durante un tsunami al usar la metodología propuesta por la Agencia Federal de Emergencias de Estados Unidos (FEMA). En esta metodología se propone el uso de programas de simulación numérica de tsunami para obtener datos altura máxima, alcance máximo (runup) y velocidad de ola de tsunami. Para esto se ha utilizado datos de topografía y batimetría de la mejor resolución existente para el área de estudio, fuentes tsunamigénicas de campo cercano para así proponer un “terremoto máximo esperado” que afecta la costa pacífica de Nicaragua con énfasis para la ciudad de Corinto. Al calcular las fuerzas actuantes a las cuales son sometidas las estructuras costeras durante los tsunamis permite realizar el diseño resistente de las mismas y dando como resultado la evacuación oportuna de la poblacional disminuir la intensidad con la afecta a la misma.

## INDICE DE CONTENIDO

I. GENERALIDADES .....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes .....	2
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos .....	7
1.4.1. Objetivo general .....	7
1.4.2. Objetivos específicos .....	7
II. MARCO TEORICO .....	8
2.1. Condiciones de sitio: fuentes tsunamigénicas, topografía y batimetría .....	8
2.1.1. Características físicas y tipos de tsunamis .....	8
2.1.2. Fuentes tsunamigénicas.....	10
2.1.3. Topografía costera .....	13
2.2. Modelamiento de eventos extremos de tsunami .....	15
2.2.1. Fundamentos del modelado de tsunamis .....	15
2.2.2. Principios hidrodinámicos.....	16
2.2.3. Modelo numérico MOST.....	18
2.3. Fuerzas que actúan en las estructuras generadas por las olas de tsunami sobre estructuras de mitigación ante tsunami .....	19
2.3.1. Fuerzas hidrostáticas .....	19
2.3.2. Fuerzas hidrodinámicas .....	21
2.3.3. Fuerzas Impulsivas .....	27
2.3.4. Formación de Diques por Escombros en el Agua .....	28
2.4. Estructuras de mitigación de un nivel ante tsunami .....	29
CAPITULO 3. DISEÑO METODOLOGICO.....	31
3.1. Caracterización de las condiciones de sitio: fuentes sísmicas, batimetría y topografía .....	32

3.1.1.	Definición de fuentes tsunamigénicas .....	32
3.1.2.	Datos batimétricos y topográficos.....	33
3.2.	Simulación numérica.....	34
3.2.1.	Ajuste de datos e ingreso de condiciones iniciales.....	35
3.2.2.	Simulación numérica del tsunami extremo .....	35
3.3.	Cálculo de fuerzas actuantes sobre estructuras de evacuación ante tsunamis	
	37	
CAPITULO 4. RESULTADOS.....		40
4.1.	Caracterización de fuentes tsunamigénicas, batimetría y topografía .....	40
4.1.1.	Fuentes tsunamigénicas.....	40
4.1.2.	Características batimétricas y topográficas .....	42
4.2.	Resultados de las simulaciones numéricas.....	45
4.2.1.	Tiempos de arribo de olas de tsunamis .....	45
4.2.2.	Máximas amplitudes de olas de tsunami (runup) .....	46
4.3.	Cálculo de fuerzas actuantes como parámetros de diseño para	
	construcciones tsunami resistentes.....	49
4.4.5.1	Altura de estructura .....	49
4.4.5.2	Fuerzas hidrostáticas.....	50
4.4.5.3	Fuerzas hidrodinámica. ....	50
4.4.5.4	Fuerzas por impulso .....	51
4.4.5.5	Fuerzas por impacto de escombros.....	51
4.4.5.6	Fuerzas por diques por escombros en el agua .....	54
CAPITULO 5. CONCLUSIONES .....		55
CAPITULO 6. RECOMENDACIONES .....		56
BIBLIOGRAFÍA.....		57
ANEXOS.....		60
Anexo A. Manual de usuario del software ComMIT .....		61

## Lista de tablas

Tabla 1. <i>Propiedades de masa y rigidez para escombros que pueden chocar con estructuras durante un tsunami</i> .....	25
Tabla 2. <i>Ecuaciones para el cálculo de fuerzas actuantes sobre infraestructuras de mitigación</i>	37
Tabla 3. <i>Descripción de fuentes tsunamigenéticas cercanas a Corinto</i> .....	41



## Lista de figuras

Figuras 1. <i>Alturas de las olas del Tsunami de 1992 en la Costa Pacífico de Nicaragua.</i> .....	5
Figuras 2. <i>Características de un tsunami durante un tsunami</i> .....	9
Figuras 3. <i>Dinámica de tectónica de placas</i> .....	10
Figuras 4. <i>Mapa tectónico de Centroamérica</i> .....	13
Figuras 5. <i>Dinámica de las olas de tsunami en costa</i> .....	14
Figuras 6. <i>Parámetros a considerar de una fuente tsunamigénica durante un tsunami</i> .....	16
Figuras 7. <i>Esquema de aguas pocas profundas</i> .....	17
Figuras 8. <i>Fuerza hidrostática resultante</i> .....	20
Figuras 9. <i>Fuerza hidrodinámica</i> .....	22
Figuras 10. <i>Fuerzas de impacto de escombros en aguas en estructuras</i> .....	24
Figura 11. <i>Estimado de la velocidad de flujo de desperdicios de gran tamaño</i> .....	26
Figura 12. <i>Ejemplos de diques o rompeolas en Japón</i> .....	30
Figura 13. <i>Etapas del proyecto de investigación</i> .....	32
Figura 14. <i>Flujo de trabajo para elaboración de modelo de relieve continuo playa-superficie</i> ...	34
Figura 15. <i>Método de anidación de grillas batimétricas utilizando el software ComMIT</i> .....	36
Figura 16. <i>Configuración de simulación numérica de tsunamis utilizando el software ComMIT</i>	37
Figura 17. <i>Fuentes tsunamigenéticas cercanas al casco urbano de Corinto</i> .....	40
Figura 18. <i>Distribución de profundidades de sondeo batimétrico en Corinto</i> .....	42
Figura 19. <i>Levantamiento batimétrico en Corinto</i> .....	43
Figura 20. <i>Topografía de superficie en la ciudad de Corinto</i> .....	44
Figura 21. <i>Tiempo de arribo de olas para fuentes tsunamigénicas cercanas a Corinto</i> .....	45
Figura 22. <i>Amplitudes máximas de olas o runup para escenarios evaluados</i> .....	47
Figura 23. <i>Parámetros para cálculo de fuerzas actuantes sobre estructuras (GCMT 1992)</i> .....	48
Figura 24. <i>Boceto para de definición para cálculos</i> .....	49

## **I. GENERALIDADES**

### **1.1. Introducción**

Desde 1539 hasta la actualidad, en el área de Centroamérica han ocurrido alrededor de 50 tsunamis. De estos, en 10 eventos se han reportado daños, 7 en las costas del Pacífico y 3 en las costas del Caribe (Molina, 1997).

El 01 de septiembre 1992, a las 8 pm, una gigantesca ola destruyó extensas áreas de la costa nicaragüense del Océano Pacífico. Las olas alcanzaron entre 4 y 10 metros de altura y fueron causadas por un terremoto de 7.6 Mw en el fondo oceánico. A consecuencia del tsunami murieron 170 personas y ocurrieron grandes daños a viviendas e infraestructura costera (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2024).

Para el tsunami de 1992, Nicaragua no contaba con las condiciones tecnológicas, organizacionales, ni con la preparación de la población, para la respuesta ante una amenaza de tsunami (INETER-GEOFISICA, 2005). El Gobierno de Nicaragua ha optado por medidas del tipo organizacional y de respuesta para disminuir el riesgo ante tsunamis. Entre estas medidas destacan el fortalecimiento de la red sísmica, instalación de estaciones de banda ancha, y software para detección y determinación de parámetros de sismo (INETER-CATAC, 2017). Otras de las medidas aplicadas es la realización de 4 ejercicios anuales de simulacros multiamenazas, con el objetivo de preparar la respuesta de la población ante estos diversos eventos. Para el caso de eventos de tsunami, la población debe saber identificar y evacuar a zonas altas.

En el caso de que en una zona no existan sitios de topografía elevada, aptos para una evacuación en corto tiempo, se presenta la necesidad de implementar la planificación y diseño de

infraestructura costera resistente a tsunamis. Como parte del proceso de diseño de este tipo de infraestructura, se utilizan simulaciones numéricas para determinar los parámetros físicos de las olas de tsunamis, tomando en cuenta las características del relieve del área y las fuentes tsunamigénicas. Estas simulaciones permiten estimar las cargas o fuerzas a las que podrían estar sometidas instalaciones portuarias e industriales ubicadas en dichas zonas, así como definir las tipologías de vivienda más adecuadas para áreas expuestas a este tipo de amenaza (FEMA, 2008).

En este trabajo se modelaron tres escenarios de amenaza para determinar el máximo terremoto esperado que afectaría el casco urbano de la ciudad de Corinto. Estos escenarios se basan en la información sobre 2 fuentes cercanas de tsunami, frente a la costa Pacífica de Nicaragua, y una fuente regional frente a la costa de El Salvador. Con base al máximo escenario de amenaza se calculó las fuerzas de impacto que afectarían al área de estudio.

Esta investigación tiene como objetivo incorporar criterios técnicos de diseño en la implementación de obras de mitigación resistentes a tsunamis en Nicaragua, con el fin de fortalecer la gestión de riesgos en las zonas costeras del país.

## **1.2. Antecedentes**

Las estrategias que han implementado la mayoría de los países para mitigar el impacto causado por los tsunamis se han concentrado en el desarrollo de sistemas de alerta temprana más eficaces, la mejora de los mapas de inundación y el fortalecimiento de la población para la evacuación ante tsunamis (Michael Mahoney, 2008). Estos esfuerzos tienen un enfoque importante en la evacuación de las personas a terrenos elevados. Estos terrenos deben estar ubicados fuera de la zona de inundación. de tsunami.

En Nicaragua, igualmente se ha aplicado el enfoque en este tipo de medidas instalación de sistema de alerta temprana desde 2005 (INETER-GEOFISICA, 2005), mapas de inundación 2006 (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER), 2006). Actualmente, en Nicaragua, no se han implementado medidas alternativas para sitios que no prestan las condiciones de terreno elevado para zonas de evacuación.

En septiembre de 2004, la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA, por sus siglas en inglés) desarrolló un proyecto que estableció guías para la construcción de estructuras resistentes a las fuerzas extremas generadas por tsunamis y terremotos (FEMA, 2008). Esta iniciativa surgió como respuesta a la vulnerabilidad de numerosas comunidades costeras, donde la evacuación hacia zonas elevadas resulta inviable debido al rápido arribo de las olas de un tsunami tras un sismo. El proyecto incluyó la determinación de alturas y velocidades de las olas en puntos costeros específicos, junto con el desarrollo de criterios técnicos para el diseño de estructuras de mitigación ante tsunamis.

Dentro de estas guías, se propone que las estructuras diseñadas deben tener un equilibrio entre los riesgos y la economía, considerando tanto aspectos técnicos como sociales. El diseño debe ser lo suficientemente flexible y redundante para resistir las vibraciones provocadas por un sismo previo a la ocurrencia de un tsunami. Así mismo, las estructuras deben ser lo suficientemente resistentes y rígidas para soportar las fuerzas generadas por el flujo del agua y el impacto de los escombros.

Las recomendaciones de esta guía no han sido incluidas en los reglamentos de la construcción de Estados Unidos, aunque ya se han implementados en algunos sitios de Estado Unidos y Japón. En el contexto nacional, en el Reglamento Nacional de la Construcción no se contempla

información sobre la amenaza de tsunamis, ni lineamientos específicos para el diseño de infraestructura resistente ante tsunamis.

### **1.3. Justificación**

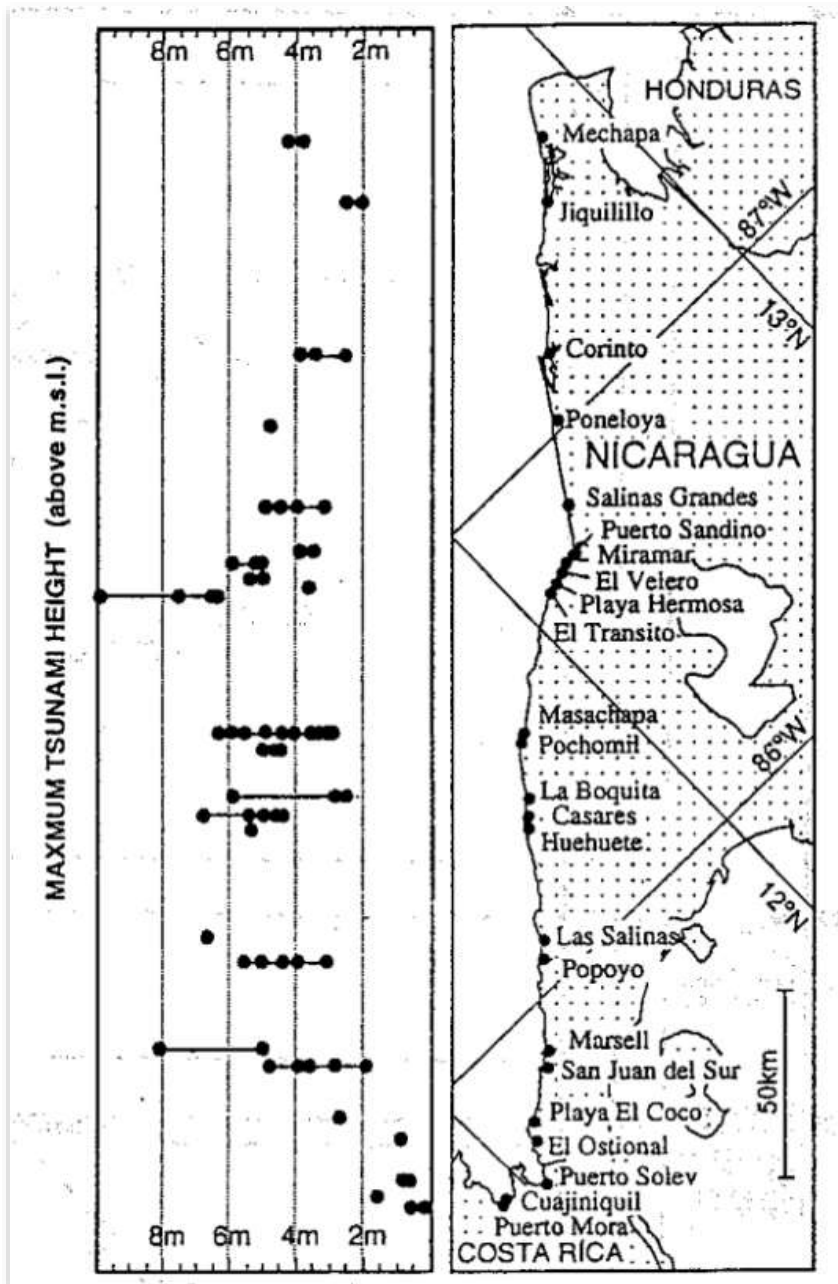
En Nicaragua, las afectaciones por el tsunami de 1992 se extendieron a lo largo de 250 km de la costa del Pacífico. En esta franja, 26 localidades urbanas sufrieron daños o destrucción de su infraestructura, y aproximadamente 40 mil personas fueron afectadas, directa o indirectamente, debido a los daños en sus viviendas y en sus medios de producción o ingresos (UNIDAS-CEPAL, 1992).

Dadas las condiciones locales del perfil del fondo marino, la altura promedio de las olas fue de 4 metros en localidades como Mechapa y Corinto (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). En otras zonas, como La Boquita y Las Salinas, las olas alcanzaron alturas de hasta 7 metros. La mayor altura alcanzada fue de 10 metros, en la localidad de El Tránsito. Durante el evento, el mayor impacto de las olas se produjo en la parte norte del municipio de Corinto, en donde la elevación del terreno es baja (2 m.s.n.m.). En esta zona, el rompeolas del puente Paso Caballos, de 3 m de altura, fue sobrepasado por las olas de 5 m.s.n.m., las cuales llegaron hasta la carretera costanera (Satake, 1993). Afortunadamente, en ese entonces no había una alta concentración de población asentada cerca del litoral de la zona norte de la ciudad (UNIDAS-CEPAL, 1992).

En contraste, el mareógrafo del puerto de la ciudad de Corinto registró alturas de olas de hasta 5 metros (Satake, 1993), y pese a ello, la infraestructura de las instalaciones portuarias y la zona industrial no sufrieron daños f significativos (UNIDAS-CEPAL, 1992).

# Figuras 1.

Alturas de las olas del Tsunami de 1992 en la Costa Pacífico de Nicaragua.



Nota: Tomado de "Tsunami Field Survey of the 1992 Nicaragua Earthquake" (p. 146), por Satake et al., 1993, Earth in Space, 74 (13).

Dada las condiciones geográficas de la ciudad de Corinto – con altura promedio de 2.44 m.s.n.m., y rodeada por el Océano Pacífico, el Estero El Realejo y el Estero Paso Caballos -, en caso de ocurrir un tsunami, la única ruta de evacuación disponible es el puente que conecta la ciudad con la localidad de Paso Caballos. Si este puente llegara a fallar, la ausencia de rutas alternativas de evacuación podría derivar en una elevada pérdida de vidas humanas.

La implementación de medidas para reducir esta vulnerabilidad puede desempeñar un papel crucial en el fortalecimiento de capacidades y la gestión de riesgos ante tsunamis en la ciudad de Corinto. Entre las medidas que se pueden implementar destacan obras de infraestructura resistentes a tsunamis, como rompeolas o diques (FEMA, 2019). Estas son estructuras de mitigación de un nivel, cuyo diseño debe garantizar resistencia frente a las fuerzas generadas durante un tsunami.

En el contexto nicaragüense, el Reglamento Nacional de la Construcción actualmente no incluye disposiciones específicas sobre la amenaza ante tsunamis, ni proporciona metodologías para el cálculo de las fuerzas que actúan sobre las obras costeras de mitigación. La incorporación de criterios técnicos para el diseño de estructuras resistentes a tsunamis representaría un avance significativo, al subsanar esta carencia normativa y fortalecer las capacidades nacionales de gestión integral del riesgo.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar los parámetros para el diseño de estructuras de mitigación ante tsunamis. Caso de aplicación en el Puerto de Corinto ante un evento de tsunami como el de 1992.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

Caracterizar las condiciones del sitio considerando aspectos topográficos, batimétricos y las fuentes generadoras de tsunamis, como base para la modelación de escenarios de amenaza.

Simular, en base a las condiciones de sitio, el mayor evento de tsunami esperado para las costas de Corinto, con el fin de identificar las alturas máximas de las olas y las distancias de inundación.

Estimar las fuerzas de impacto generadas por las olas de tsunami, como criterios clave para el diseño de estructuras de mitigación en zonas costeras de Corinto.



## **II. MARCO TEORICO**

### **2.1. Condiciones de sitio: fuentes tsunamigénicas, topografía y batimetría**

#### **2.1.1. Características físicas y tipos de tsunamis**

Un tsunami es una serie de olas generadas de forma natural como resultado de un disturbio rápido y de gran magnitud en un cuerpo de agua. La causa más común son los terremotos ocurridos bajo o cerca del fondo marino, aunque también pueden originarse por actividad volcánica, deslizamientos submarinos o el impacto de objetos extraterrestres. Los tsunamis de origen sísmico se producen principalmente en zonas de subducción, donde una placa oceánica se desliza bajo una placa continental (como las placas de Cocos y Caribe en el caso de Nicaragua) o bajo otra placa más joven.

Las olas generadas por estos eventos se propagan radialmente desde el epicentro del disturbio. En aguas profundas, estas olas tienen longitudes de entre 100 y 300 km, lo que les da una apariencia tranquila y poco perceptible. Sin embargo, debido a su gran longitud, su energía afecta toda la columna de agua hasta el lecho marino. Otra característica relevante es su alta velocidad de propagación en aguas profundas, directamente relacionada con la profundidad del océano.

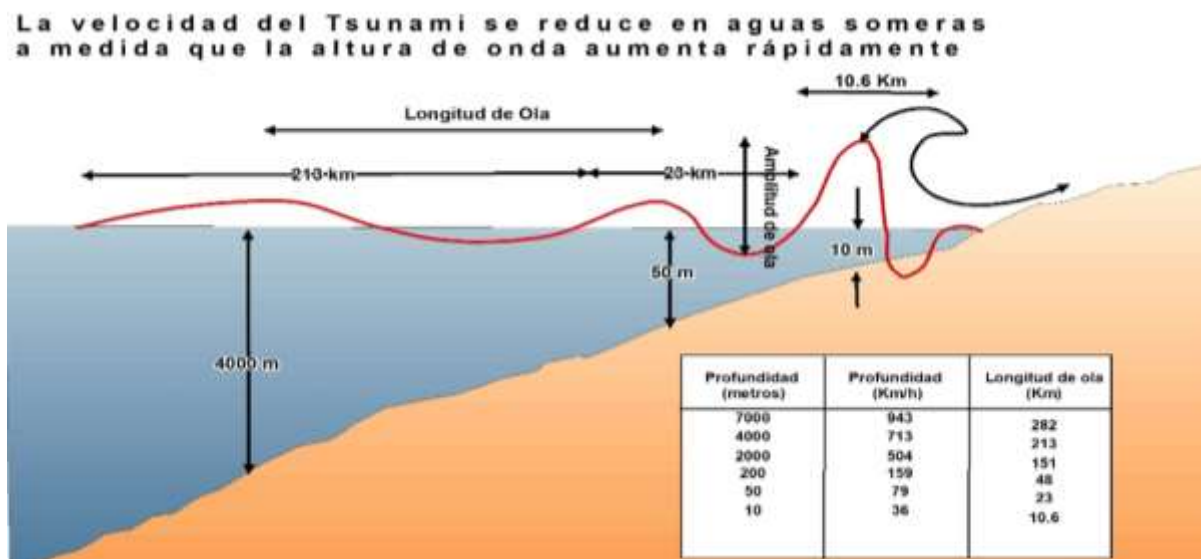
En la Figuras 2 se observa las características de un tsunami durante un tsunami. Al aproximarse a la costa, la velocidad del tsunami disminuye debido al descenso en la profundidad, lo que provoca una reducción en la longitud de onda y un aumento en la amplitud. Este fenómeno genera un mayor impacto al alcanzar la costa, ocasionando daños significativos en infraestructuras ubicadas en zonas bajas. FEMA, 2019.

Las características geomorfológicas de las costas representan un papel importante el arribo de olas de tsunami, por lo cual se puede considerar dos casos:

- En el caso en cual las características costeras donde las pendientes del fondo marino son muy empinadas, provoca que la mayor parte de la energía del tsunami sea reflejada. Provocando el riesgo de inundación en zonas más focalizadas, pero con alturas de olas significativamente mayores que áreas con pendientes suaves.
- En el caso de en costas con pendientes suaves, mayormente en presencia de bahías abiertas frente a altar, la energía del tsunami queda atrapada al llegar a la costa. Sabiendo que la velocidad del tsunami depende la profundidad, el flujo de energía tiende a ser constante, por lo tanto, si la velocidad decrece, la amplitud debe de aumentar, disminuyendo periodo entre olas, esto permitiendo que estas se extiendan por varios metros o kilómetros.

## Figuras 2.

*Características de un tsunami durante un tsunami*



Nota: Características de la propagación de olas de tsunami de aguas profundas a poco profundas tomado de ITIC, 2021. Tsunami Las Grandes Olas (p.4).

### 2.1.2. Fuentes tsunamigénicas

La tectónica de placas explica que la litosfera está dividida en bloques que flotan sobre la astenosfera. Estas placas se mueven entre sí y generan tres tipos principales de bordes: divergentes, convergentes (subducción) y transformantes. En los bordes de subducción, una placa oceánica se hunde bajo otra, generando intensa actividad sísmica y, en muchos casos, tsunamis (ITIC, 2021).

La Figuras 3 muestra esta dinámica en el margen pacífico centroamericano, donde la placa de Cocos subduce bajo la del Caribe y el bloque de Panamá. Se destacan zonas con fuerte actividad sísmica, como Nicaragua y Costa Rica, donde el acoplamiento entre placas es alto y superficial, lo cual incrementa el potencial tsunamigénico (Audet y Schwartz, 2013; Ye et al., 2013).

#### Figuras 3.

*Dinámica de tectónica de placas*



Nota: Dinámica de la tectónica de placas y cómo influye en la sismicidad de la región tomado de ITIC, 2021. Tsunami Las Grandes Olas (p.2).

La convergencia entre la placa de Cocos y el Caribe ocurre a velocidades de 7.5 a 9.0 cm/año, aumentando de norte a sur (DeMets et al., 2010). La Figura 4 presenta los cambios batimétricos a lo largo de la fosa mesoamericana, donde se observa una transición desde un relieve submarino suave (frente a Guatemala) hasta una batimetría accidentada (frente a Costa Rica), producto de la presencia de montes submarinos y de la dorsal de Cocos (Barckhausen et al., 1998; Hey, 1977). Esta dorsal, una corteza oceánica de hasta 20 km de grosor, ha estado subduciéndose durante millones de años (de Boer et al., 1988, 1995; Lonsdale y Klitgord, 1978; Sallarés, 2003), generando un fuerte acoplamiento tectónico (Sitchler et al., 2007), deformación del antearco (Sak et al., 2009) y sismicidad superficial en la zona de Benioff (Protti et al., 1994; Dzierma et al., 2011).

La batimetría juega un papel fundamental en la generación de tsunamis, ya que estructuras como montes submarinos o dorsales actúan como asperidades que concentran esfuerzos sísmicos, facilitando rupturas lentas y superficiales (Bilek et al., 2003; Wang y Bilek, 2014). Estas condiciones son propias de los llamados sismo-tsunamis, definidos por Kanamori (1972), donde las magnitudes muestran disparidades (por ejemplo, el terremoto de Nicaragua de 1992: mb 5.3, Ms 7.2, Mw 7.6), con rupturas lentas y duraciones anómalamente largas (Kikuchi y Kanamori, 1995; Newman y Okal, 1998; Satake, 1994).

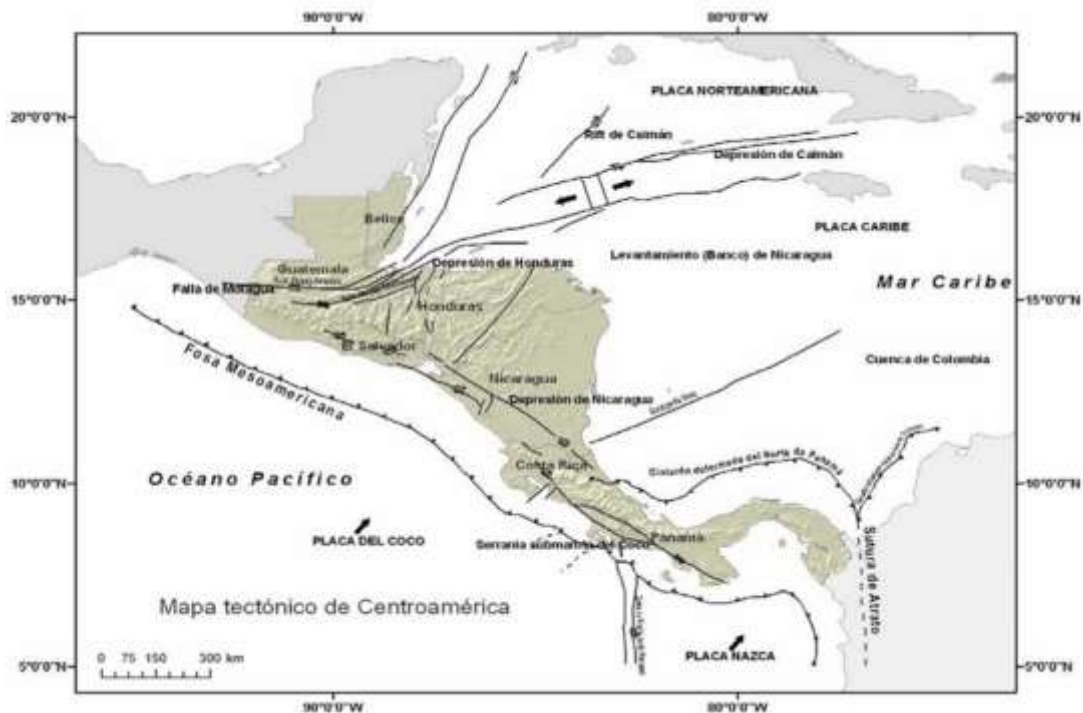
En 1992, un sismo de magnitud 7.6 frente a Nicaragua generó un tsunami con runup de hasta 10 metros (Satake et al., 1993); y en 2012, otro sismo en El Salvador (Mw 7.3) produjo un runup de 6 metros (Barrero et al., 2014). Ambos son ejemplos de tsunamis locales generados por sismos lentos en zonas con alta presión de poros y escasa sedimentación (Von Huene y Scholl, 1991), donde se propuso que los montes submarinos hundidos actuaron como asperidades clave en la ruptura (McIntosh et al., 2007; Bilek y Lay, 2002).

En el sur de América Central, la zona de fractura de Panamá separa las placas de Cocos y Nazca. En esta región, la subducción de la placa de Nazca bajo el bloque de Panamá también produce sismos significativos (Adamek et al., 1988; Kolarsky y Mann, 1995). Más al sur, la placa de Nazca subduce bajo Sudamérica a un ritmo de 5.5 cm/año, afectando el margen Colombia–Ecuador, una zona con antecedentes de grandes sismos tsunamigénicos (Collot et al., 2002). Destaca el terremoto de 1906 (Mw 8.6), que generó un tsunami transoceánico (Okal, 1992; Bilek, 2010), aunque no se tienen registros históricos previos a ese evento para estimar los ciclos sísmicos (Herd et al., 1981; Kanamori y McNally, 1982; Swenson y Beck, 1996).

El análisis regional sugiere que los tsunamis locales representan el mayor peligro para América Central (Álvarez-Gómez et al., 2013). Las diferencias en mecanismos de ruptura a lo largo de la fosa mesoamericana —como zonas de bajo acoplamiento interplaca intercaladas con áreas de fuerte acoplamiento— podrían explicar la ausencia de grandes terremotos entre placas, a pesar de que sí ocurren eventos capaces de generar tsunamis destructivos (Wang y Bilek, 2014; Ye et al., 2013).

#### Figuras 4.

##### Mapa tectónico de Centroamérica



Nota: Mapa de la dinámica tectónica de Centroamérica, tomado de Proyecto Resis II, Evaluación de la Amenaza en Centroamérica, 2008. (p.18).

#### 2.1.3. Topografía costera

La topografía costera influye de manera determinante en el comportamiento de un tsunami al alcanzar tierra firme. Factores como el relieve, la pendiente del terreno y la presencia de barreras naturales condicionan tanto la altura de las olas como la extensión de la inundación (NOAA, 2023).

Las zonas con topografía son particularmente vulnerables, ya que permiten una mayor penetración del agua tierra adentro. En contraste, terrenos elevados o irregulares pueden reducir significativamente la extensión de la inundación (Umitsu, 2007). Además, la erosión costera es más severa en áreas con suelos frágiles o desprovistos de cobertura vegetal y barreras naturales.

La vegetación costera y las elevaciones naturales actúan como defensas efectivas frente al impacto de las olas (U.S. National Park Service, 2018).

En el análisis del impacto de tsunamis, destacan tres parámetros clave:

- Runup: altura máxima alcanzada por la ola medida desde el nivel medio del mar.
- Altura de inundación: altura de la ola medida también desde el nivel medio del mar, en zonas costeras.
- Profundidad de inundación: altura del agua medida desde el nivel del suelo.

La Figura 5 presenta de forma esquemática estos tres conceptos, ilustrando cómo varía la interacción de un tsunami con el terreno costero según su morfología. La figura muestra que en áreas de baja pendiente, el runup puede penetrar más profundamente, mientras que en zonas con topografía abrupta, el runup se eleva, pero no avanza tanto horizontalmente. Esta información es clave para la zonificación de riesgo y el diseño de medidas de mitigación.

### Figuras 5.

*Dinámica de las olas de tsunami en costa*



*Nota:* Datos característicos de olas de tsunami al entrar en costa Fumihiko Imamura, 2007.

## **2.2. Modelamiento de eventos extremos de tsunami**

### **2.2.1. Fundamentos del modelado de tsunamis**

El modelado de tsunamis consiste en la simulación numérica del comportamiento de las olas, desde su generación hasta su impacto en la costa. Este proceso utiliza modelos matemáticos basados en las ecuaciones de aguas poco profundas, ecuaciones tipo Boussinesq y herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD), con el objetivo de estimar la altura, velocidad y extensión de la inundación causada por un tsunami. Estas simulaciones son esenciales para apoyar la planificación costera y reducir el riesgo ante desastres naturales (Arcas, 2010).

El desarrollo de un evento de tsunami se divide en tres fases principales:

- Generación: proceso inicial asociado a la perturbación del fondo marino.
- Propagación: desplazamiento de las olas a través del océano.
- Inundación costera: interacción del tsunami con la costa, causando el mayor impacto.

La representación de la fuente sísmica responsable del tsunami se realiza mediante modelos físicos y geométricos. Conceptualmente, se utiliza la teoría de dip para describir el ángulo con el que el plano de falla se inclina hacia abajo desde el borde superior. Este ángulo, siempre positivo entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , es esencial para definir la geometría de la ruptura.

El modelo de Okada (1992) es ampliamente utilizado para calcular la deformación del fondo marino generada por un terremoto. Este modelo asume una falla rectangular en un medio elástico y considera los siguientes parámetros (Lobon, 2015):

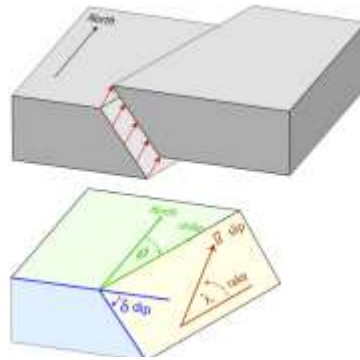
- Dimensiones de la falla (L, W): longitud y ancho del plano de falla, en metros o kilómetros.
- Epicentro: ubicación geográfica del evento, en coordenadas de latitud y longitud.



- Profundidad: punto bajo el lecho marino donde se inicia la ruptura.
- Strike: orientación del plano de falla medida desde el norte en el sentido horario.
- Dip: ángulo de inclinación del plano de falla.
- Slip: desplazamiento promedio del bloque superior respecto al inferior.
- Rake: dirección del deslizamiento dentro del plano de falla.

## Figuras 6.

*Parámetros a considerar de una fuente tsunamigénica durante un tsunami*



Nota: definición de ángulos strike, dip y rake para un plano de falla, tomado de: propagación de olas e inundación por tsunami: análisis numérico de una solución. (p.11)

### 2.2.2. Principios hidrodinámicos

El modelado numérico de tsunamis se basa en las ecuaciones de aguas poco profundas, una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes que describe la conservación de masa y cantidad de movimiento en fluidos. Estas ecuaciones, de tipo hiperbólico y no lineales, omiten efectos de dispersión y Coriolis, permitiendo una simulación eficiente de la propagación del tsunami (NOAA, 2014).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(M + M_d) + \frac{\partial}{\partial y}(N + N_d) = H \quad (2-1)$$

Donde  $U$  es el vector de variables,  $M$ ,  $M_d$ ,  $N$  y  $N_d$  son los vectores de flujos convectivos y difusivos en las direcciones  $x$  y  $y$  respectivamente.  $H$  es el vector de fricción y termino fuente. Las expresiones vectoriales,  $U$ ,  $M$  y  $N$  son

$$U = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{gh^2}{2} \\ huv \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + \frac{gh^2}{2} \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

Donde  $h$  es la profundidad del agua,  $u$  y  $v$  los promedios de las velocidades (sobre la profundidad y tiempo en flujos turbulentos) y  $g$  la aceleración de la gravedad. Las correspondientes expresiones para flujos difusivos  $M$  y  $N$  pueden ser escritos

$$M_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -\epsilon h \frac{\partial u}{\partial x} \\ -\epsilon h \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} \quad N_d = \begin{bmatrix} 0 \\ -\epsilon h \frac{\partial u}{\partial y} \\ -\epsilon h \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

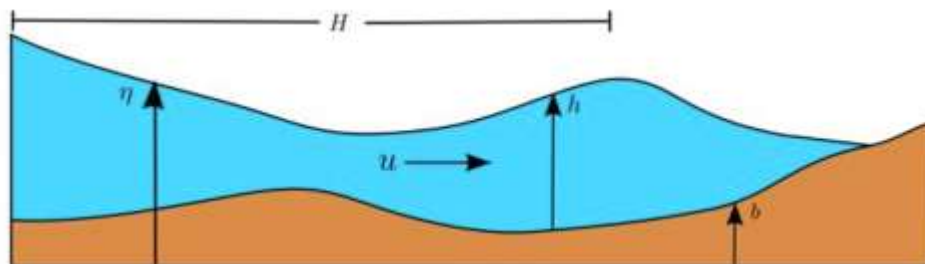
Donde  $\epsilon$  es el coeficiente de fricción cinemática.  $H$  es:

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(s_{ox} - s_{fx}) \\ gh(s_{oy} - s_{fy}) \end{bmatrix}$$

y si  $s_{ox}$  y  $s_{oy}$  son las pendientes del fondo marino en las direcciones cartesianas.  $s_{fx}$  y  $s_{fy}$  son la fricción de fondo marino, usualmente por medio de formulas empiricas

## Figuras 7.

*Esquema de aguas pocas profundas*



Nota: Esquema de variables que actúan en la ecuación de aguas pocas profundas, tomado de: propagación de olas e inundación por tsunamis: análisis numérico de una solución. (p.12).

### 2.2.3. Modelo numérico MOST

El modelo MOST (Method of Splitting Tsunamis) simula todas las fases de un tsunami: generación, propagación oceánica e inundación costera. Emplea una técnica de splitting, que divide el problema en sistemas de ecuaciones hiperbólicas simplificadas, facilitando el cálculo numérico (NOAA, 2014).

MOST requiere como entrada: Información de la fuente tsunamigénica y batimetría y topografía costera. Como salida, proporciona estimaciones de altura y velocidad de las olas, así como extensión de la inundación en la costa. La Interfaz ComMIT es una interfaz gráfica basada en el modelo MOST, diseñada para facilitar simulaciones costeras en cualquier región. Requiere datos de entrada como:

- Batimetría y topografía.
- Condiciones iniciales y de contorno.
- Parámetros del modelo (resolución, paso de tiempo, duración).

La interfaz está organizada en cinco pestañas:

- *Model Setup*: configuración general del modelo (fricción, paso de tiempo, umbrales).
- *Propagation Max Amp*: visualización de energía liberada por la fuente.
- *Grid Batymetry*: información sobre grillas anidadas.
- *Results Animations*: animaciones de propagación del tsunami y series temporales.
- *Result Extrema*: resultados máximos y mínimos de altura y velocidad de ola, compartibles vía web.

Esta herramienta permite visualizar y comparar simulaciones de forma práctica y eficiente, apoyando la preparación ante tsunamis (NOAA, 2014).

## 2.3. Fuerzas que actúan en las estructuras generadas por las olas de tsunami sobre estructuras de mitigación ante tsunami

### 2.3.1. Fuerzas hidrostáticas

Las fuerzas hidrostáticas se generan cuando agua en reposo o con movimiento lento interactúa con una estructura. Estas fuerzas actúan perpendicularmente a la superficie del componente afectado y se producen por el desbalance de presión entre los niveles de agua en lados opuestos de una estructura (FEMA, 2008).

Son especialmente relevantes en estructuras lineales como diques o muros de contención, así como en paneles individuales donde existe una diferencia sustancial en el nivel de agua entre ambos lados.

La fuerza hidrostática horizontal  $F_h$  sobre un panel puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$F_h = p_c A_w = \frac{1}{2} \rho_s g b h_{max}^2 \quad (2-4).$$

Donde:  $p_c$  es la presión hidrostática,  $A_w$  es el área mojada del panel,  $\rho_s$  es la densidad del líquido incluyendo el sedimento ( $1200 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  es la aceleración gravitacional,  $b$  es el ancho del muro y  $h_{max}$  es la altura máxima del agua sobre la base del muro en el lugar de la estructura. Si el panel de muro con altura  $h_w$  está completamente sumergido, entonces la fuerza hidrostática horizontal puede escribirse mediante la ecuación (2-5).

$$F_h = p_c A_w = \rho_s g \left( h_{max} - \frac{h_w}{2} \right) b h_w \quad (2-5)$$

Donde:  $h_{max}$  es la diferencia vertical entre la elevación del alcance de tsunami de diseño  $R$  y la elevación base del muro de la estructura,  $z_w$  como se muestra en la Ecuación (2-6)

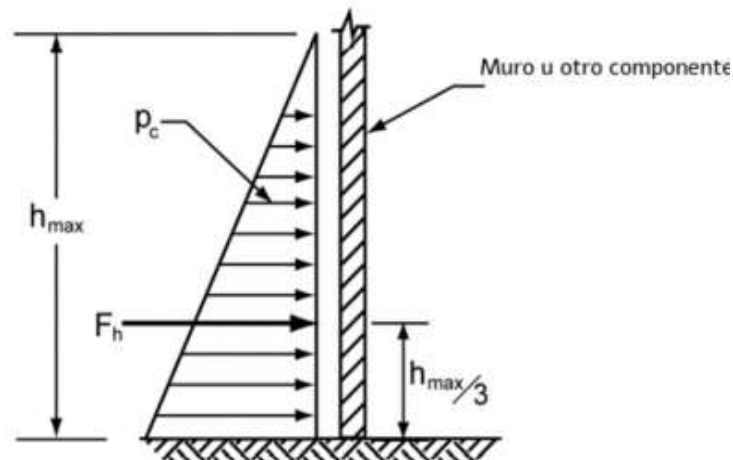
$$h_{max} = 1.3R^* - Z_W = R - Z_W \quad (2-6)$$

Donde:  $R^*$  es la elevación del alcance máximo del tsunami (Runup) basada en un modelo de simulación numérica detallada, o mapas de inundación de tsunami disponibles. La elevación del alcance de diseño  $R$ , se toma como 1.3 veces la elevación de alcance máxima pronosticada  $R^*$ .

La Figura 8 muestra la ubicación de la línea de acción de la fuerza hidrostática, fundamental para calcular el momento flector en la base del muro. Esta información es clave para el diseño estructural frente a cargas hidrostáticas inducidas por tsunamis.

### Figuras 8.

*Fuerza hidrostática resultante*



Nota Diagrama de fuerza hidrostática resultante aplicada en una estructura Tomado: Guías para el diseño de Estructuras de Evacuación Vertical Fema, 2008. (p74)

### 2.3.2. Fuerzas hidrodinámicas

Las fuerzas hidrodinámicas se generan cuando el agua en movimiento interactúa con una estructura. Estas fuerzas actúan sobre toda la superficie expuesta y son función de la densidad del fluido, la velocidad del flujo y la geometría del objeto.

También conocidas como fuerzas de arrastre, combinan dos componentes principales:

- Presión dinámica ejercida por la masa de agua en movimiento,
- Fricción causada por el flujo del agua al rodear la estructura.

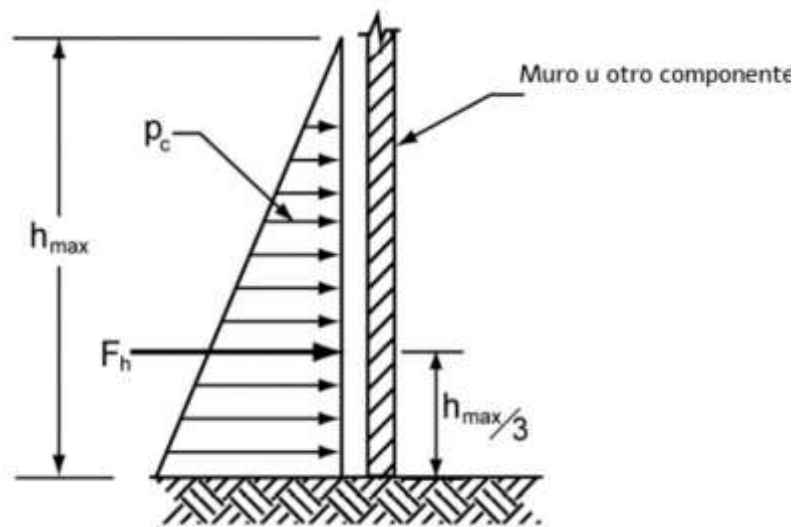
Este tipo de fuerza es relevante durante la fase de propagación o inundación de un tsunami, cuando las olas impactan con velocidad significativa sobre edificios, muros y elementos estructurales expuestos. La fuerza hidrodinámica total puede calcularse con la ecuación: (2-7).

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} \quad (2-7)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del líquido incluyendo el sedimento ( $1200 \frac{Kg}{m^3}$ ),  $C_d$  es el coeficiente de arrastre,  $B$  es el ancho de la estructura en el plano normal a la dirección del flujo (ejemplo, el ancho en la dirección paralela a la costa),  $h$  es la profundidad del flujo y  $u$  es la velocidad del flujo en el lugar de la estructura. Para fuerzas sobre componentes,  $B$  se toma como el ancho del componente. Se recomienda que el coeficiente de arrastre se tome como  $C_d = 2.0$ . La fuerza hidrodinámica resultante, se aplica aproximadamente en el centroide de la superficie mojada del componente, como se muestra en la Figura 9.

## Figuras 9.

### Fuerza hidrodinámica



Nota Diagrama de fuerza hidrodinámica resultante aplicada en una estructura Tomado: Guías para el diseño de Estructuras de Evacuación Vertical Fema, 2008. (p76)

La combinación  $h u^2$  representa el flujo de momento por unidad de masa. Nótese que  $(h u^2)_{max}$  no es igual a  $h_{max} u_{max}^2$ . La profundidad máxima del flujo  $h_{max}$ , y la velocidad máxima del flujo  $u_{max}$ , en un lugar en particular, pueden no ser simultáneas. Las fuerzas hidrodinámicas deben basarse en el parámetro  $(h u^2)_{max}$ , el cual, es el flujo de momento máximo por unidad de masa que ocurre en el lugar en cualquier momento durante el tsunami.

El valor máximo de  $(h u^2)$  puede obtenerse mediante un modelo de simulación numérica detallada o adquiriendo información de simulaciones existentes. El modelo numérico en la zona de alcance debe aplicarse con un tamaño de gráfica muy fino para asegurar la exactitud adecuada en el pronóstico de  $h u^2$ . El valor de  $(h u^2)_{max}$  puede estimarse ampliamente usando la Ecuación (2-8).

$$(hu^2)_{max} = gR^2 \left( 0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right) \quad (2-8)$$

Donde  $g$  es la aceleración por gravedad,  $R$  es la elevación del alcance de diseño, y  $z$  es la elevación del suelo en la base de la estructura. La elevación del alcance de diseño se toma como 1.3 veces la elevación máxima del alcance  $R^*$ , la cual es la elevación máxima de inundación en la estructura basada en un modelo de simulación numérica detallado, o en la elevación del suelo en la penetración máxima del alcance en los mapas de inundación de tsunamis disponibles. Para usar esta fórmula, la información del nivel del mar debe ser consistente con la utilizada en los mapas de inundación.

Las fuerzas de impacto por escombros en el agua (ejemplo, madera flotante, troncos, botes, contenedores de carga, automóviles, edificios) pueden ser una causa dominante de daños a edificios. La fuerza de impacto de los escombros puede estimarse usando la Ecuación (2-9):

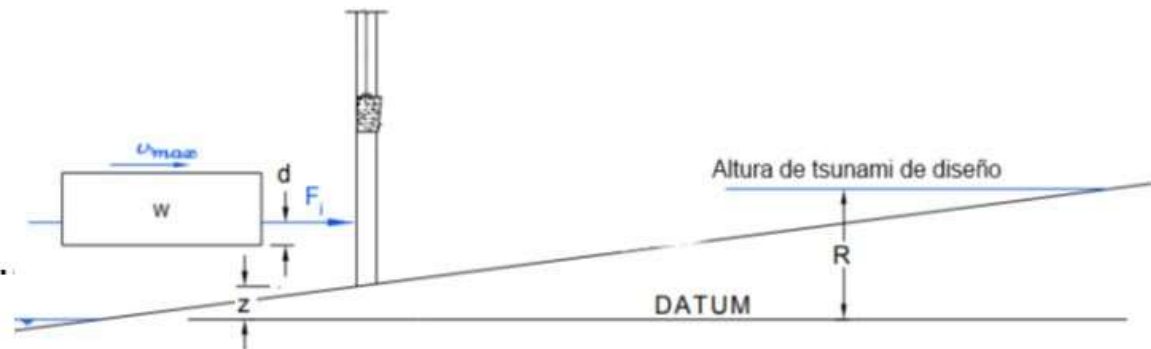
$$F_i = C_m u_{max} \sqrt{km} \quad (2-9)$$

Donde  $C_m$  es el coeficiente de masa añadida,  $U_{max}$  la velocidad máxima del flujo que lleva escombros al lugar,  $m$  y  $k$  son la masa y la rigidez efectiva de los escombros, respectivamente. Se recomienda que el coeficiente de masa añadida se tome como  $C_m = 2.0$ . A diferencia de otras fuerzas, se presume que las fuerzas de impacto actúan localmente sobre un elemento de la estructura a la altura de la superficie del agua.



## Figuras 10.

### *Fuerzas de impacto de escombros en aguas en estructuras*



Nota Diagrama de fuerzas producidas por escombros como árboles, botes o contenedores aplicada en una estructura Tomado de: guías para el diseño de Estructuras de Evacuación Vertical Fema, 2008. (p79)

El impacto de escombros transportados por tsunamis representa una carga significativa para estructuras costeras. La magnitud de esta fuerza depende principalmente de la masa del objeto y su velocidad al momento del impacto

La Ecuación (2-9) se utiliza para calcular la fuerza de impacto, siempre que se conozcan las propiedades de masa y rigidez del escombros. Valores aproximados para tipos comunes de escombros en el agua se encuentran en la Tabla 1. Para otros objetos, estas propiedades deben estimarse como parte del proceso de diseño estructural. Los escombros pequeños y livianos, como madera o troncos, suelen alcanzar mayores velocidades porque requieren poco calado para flotar. Por el contrario, escombros más grandes y pesados necesitan mayor profundidad de agua y se mueven más lentamente.

La velocidad máxima del flujo para una profundidad dada puede obtenerse mediante simulaciones numéricas detalladas o datos existentes. Sin embargo, se debe tener en cuenta

que la precisión de estas simulaciones disminuye cuando se trata de predecir velocidades de flujo, especialmente si la resolución espacial del modelo en la zona de runup no es lo suficientemente alta.

**Tabla 1.**

*Propiedades de masa y rigidez para escombros que pueden chocar con estructuras durante un tsunami*

<b>Escombros</b>	<b>Masa (m) Kg</b>	<b>Rigidez efectiva (K) N/m</b>
Maderas o troncos	450	2.4 x 10 <sup>6</sup>
Contenedor de carga estándar de 40 pies	3800	6.5 x 10 <sup>8</sup>
Contenedor de carga estándar de 20 pies	2200	1.5x 10 <sup>9</sup>
Contenedor de carga pesada de 40 pies	2400	1.7 x 10 <sup>9</sup>

Nota Tabla de propiedades de masa y rigidez de escombros cuando se encuentran en agua  
Tomado: guías para el diseño de Estructuras de Evacuación Vertical Fema, 2008. (p79)

En ausencia de simulaciones numéricas, la velocidad máxima de flujo para escombros con calado despreciable (como troncos flotantes) puede estimarse mediante una solución analítica para el runup en una playa con pendiente uniforme y sin variaciones topográficas, como se expresa en la ecuación (2-10).

$$u_{max} = \sqrt{(2gR(1 - (\frac{Z}{R}))} \quad (2-10)$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $R$  es la altura de alcance de diseño, que es 1.3 veces la elevación del suelo,  $R^*$  es el Runup o altura máxima de alcance de tsunami y  $Z$  es la elevación del suelo en la estructura (el datum debe de ser referido al nivel medio del mar).

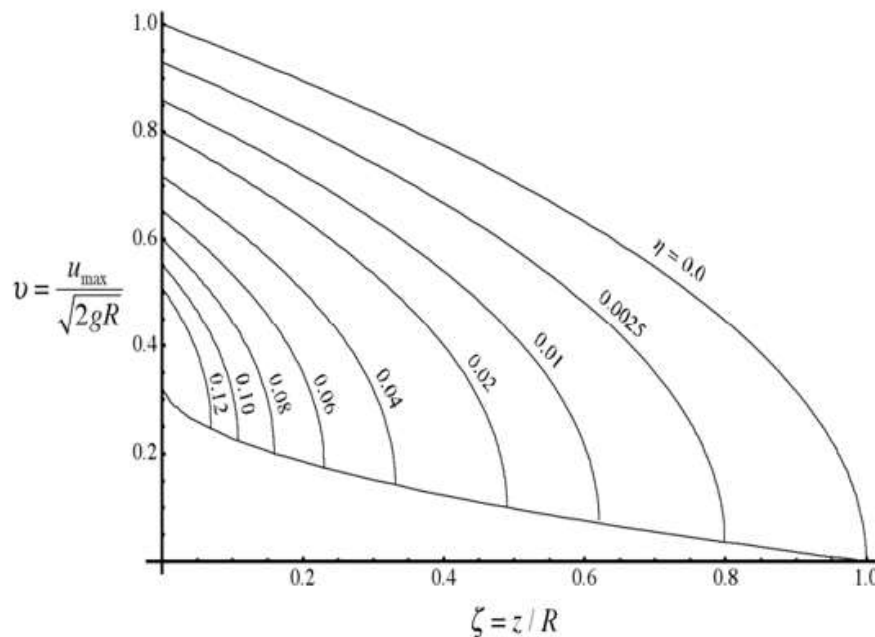
Para un contenedor con calado  $d$  a la altura de  $R$  puede calcularse según el gráfico 2 puede estimarse para calcular la velocidad de flujo. El calado  $d$  puede estimarse usando la ecuación (2-11):

$$d = \frac{W}{\rho g A_{box}} \quad (2-11)$$

Donde  $W$  es el peso del escombros,  $\rho_s$  es la densidad del líquido incluyendo el sedimento ( $1200 \frac{Kg}{m^3}$ ),  $g$  es la aceleración por gravedad y  $A_f$  es el área paralela al agua, como producto de  $d \times A_f$  que presenta el volumen desplazado por los escombros.

**Figura 11.**

*Estimado de la velocidad de flujo de desperdicios de gran tamaño*



Nota: Velocidad máxima de flujo,  $d^{\wedge}$  a la elevación del suelo,  $z^{\wedge}$  y la elevación máxima del alcance o Runup  $R$ . La curva inferior representa el límite más bajo de la velocidad máxima de flujo. Tomado de: Tomado: Guías para el diseño de Estructuras de Evacuación Vertical Fema, 2008. (p81)

Basada que la curva apropiada para  $d/R$  y la razón apropiada entre la elevación de la estructura relativa a la elevación del alcance de diseño  $z/R$ . La Figura 11 brinda un estimado de la velocidad de flujo. Este gráfico debe de entenderse como una solución analítica para condiciones de una playa con inclinación uniforme, sin variación topográfica lateral y sin fricción. Los valores pueden diferir de las velocidades reales.

### 2.3.3. Fuerzas Impulsivas

Las fuerzas impulsivas se generan por el impacto frontal de marejadas sobre estructuras, especialmente en zonas previamente inundadas. Ramsden (1993) observó que, en terreno seco, el impacto inicial no produce fuerzas significativas. Sin embargo, en condiciones de inundación previa, las olas de macareo generan un aumento de fuerza de hasta 1.5 veces la fuerza hidrodinámica, lo cual fue confirmado por Arnason (2005). El incremento se debe al golpe súbito del frente de ola, como lo señaló Yeh (2007). En estos casos, las fuerzas impulsivas superan a las de la marejada inicial sobre terreno seco y pueden volverse críticas para el diseño estructural. Por seguridad, se recomienda considerar la fuerza impulsiva como 1.5 veces la fuerza hidrodinámica, según la ecuación (2-12).

$$F_s = 1.5F_d \quad (2-12)$$

ASCE/SEI 7-16 requiere que la fuerza impulsiva considere en lugares propensos a experimentar perforaciones y solo para elementos estructurales de ancho más de 3 veces la profundidad de inundación.

#### 2.3.4. Formación de Diques por Escombros en el Agua

La acumulación de escombros flotantes puede formar un dique frente a las estructuras, generando una fuerza adicional que se trata como una fuerza hidrodinámica modificada. Esta fuerza aumenta proporcionalmente al ancho del dique formado en la dirección perpendicular al flujo. La fuerza total se calcula con la siguiente expresión (2-13):

$$F_{dm} = \frac{1}{2} \rho_s C_d B_d (hu^s)_{\max} \quad (2-13)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del líquido incluyendo el sedimento (1200 kg/m<sup>3</sup>),  $C_d$  es el coeficiente de arrastre,  $B_d$  es el ancho del dique de escombros en el plano normal a la dirección del flujo (ejemplo, el ancho en la dirección paralela a la costa),  $h$  es la profundidad del flujo o inundación y  $u$  es la velocidad del flujo en el lugar de la estructura. Para fuerzas sobre componentes,  $B$  se toma como el ancho del componente. Se recomienda que el coeficiente de arrastre se  $C_d = 2.0$ . el flujo de momento  $(hu^2)_{\max}$  puede obtenerse mediante un modelo simulación detallado o adquiriendo información existente de simulaciones.

Para componentes estructurales individuales,  $B_d$  se toma como el ancho del componente considerado. Dado que la acumulación de escombros se distribuye sobre varios elementos estructurales, la fuerza debe asignarse por un ancho tributario apropiado y distribuirse de manera uniforme a lo largo de la altura sumergida del componente resistente. Se recomienda asumir un ancho típico de dique de escombros de 12 metros (40 pies), equivalente a un contenedor de carga lateral o un volumen representativo de madera flotante.

#### **2.4. Estructuras de mitigación de un nivel ante tsunami**

En la Figura 12. se observa un ejemplo de los rompeolas, que son estructuras costeras diseñadas para reducir la energía de las olas antes de que lleguen a tierra. En el caso de tsunamis, pueden mitigar su impacto al disminuir la velocidad y altura del frente de ola, lo que permite ganar tiempo para la evacuación y reduce el daño potencial. Su efectividad depende de factores como su altura, longitud, ubicación, y las características del tsunami y del entorno costero.

En la Figura 13 se observa un ejemplo de dique o rompeolas ante tsunami. Los diques o muros de contención funcionan como barreras físicas que protegen áreas costeras al reducir la fuerza y el alcance de las olas de tsunami. Además de contener el flujo, proporcionan tiempo adicional para la evacuación y minimizan daños estructurales. Son especialmente útiles para proteger infraestructuras críticas y áreas urbanas densamente pobladas.

**Figura 12.**

*Ejemplos de diques o rompeolas en Japón*

a) Rompeolas de 14.7 metros en la playa de koizumi.



b) Dique en Ofunato, prefectura de Iwate, Japón



*Nota:* 12.a Tomado de sitio web: <https://www.nippon.com/>. 12b, Tomado de sitio web: <https://swissinfo.ch/>

### CAPITULO 3. DISEÑO METODOLOGICO

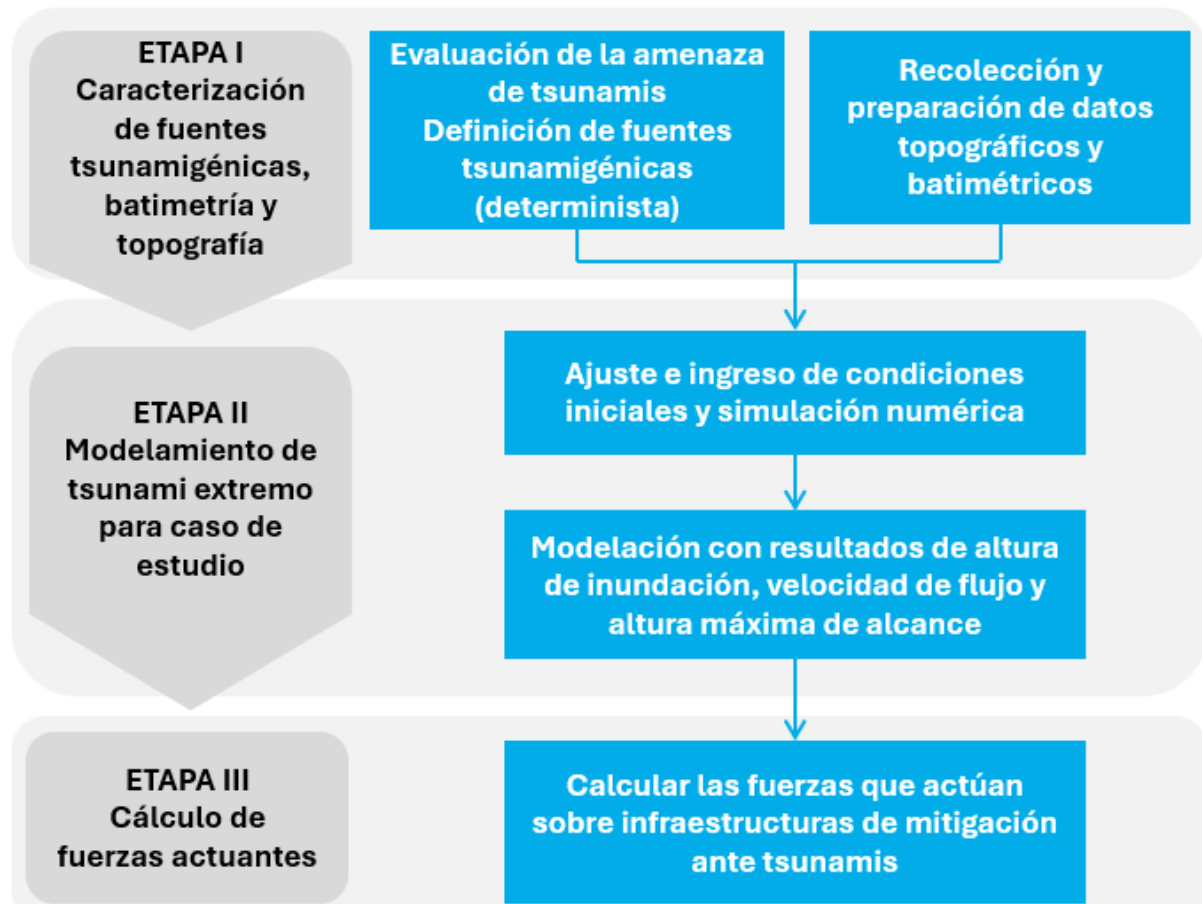
De acuerdo con su naturaleza, la investigación fue de tipo **experimental y aplicativa**, porque consistió en implementar la metodología FEMA (2019) para la generación de parámetros de diseño para obras de mitigación resistentes ante tsunamis. El trabajo se llevó a cabo bajo un **enfoque cuantitativo y determinístico**, cuyos resultados incluyen el modelamiento de un evento extremo de referencia parametrizado con datos locales. Con el fin de validar la utilidad de la metodología FEMA (2019) en un contexto concreto, se seleccionó como **área de estudio** la ciudad Corinto, cabecera del municipio Corinto, ubicada en el departamento Chinandega. Corinto es una ciudad insular, que abarca 70.67 km<sup>2</sup> y se extiende 5.43 km lineales a lo largo de la isla. Su topografía es plana, con elevaciones promedio de m.s.n.m. En total, cuenta con una población de 18,500 habitantes por lo que su densidad poblacional es alta con 261.8 hab/km<sup>2</sup> (INIDE, 2019). Esta ciudad cuenta con 20 barrios o sectores y se destaca por su puerto de aguas profundas, infraestructura crítica para el desarrollo económico del país. La red vial principal es asfaltada y/o con revestimiento ligero y su única conexión terrestre con el resto del territorio nacional se establece a través del puente Paso Caballos.

El proyecto constó de tres etapas, I) Caracterización de fuentes tsunamigénicas, batimetría y topografía, II) Modelamiento de tsunami extremo para caso de estudio y III) Cálculo de fuerzas actuantes. La figura 13 presenta una síntesis del estudio. Cada una de las etapas se describen a posteriormente.



**Figura 13.**

*Etapas del proyecto de investigación*



*Nota.* Adaptado del documento Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis (p. 42). Por FEMA, 2019.

### **3.1. Caracterización de las condiciones de sitio: fuentes sísmicas, batimetría y topografía**

#### **3.1.1. Definición de fuentes tsunamigénicas**

La identificación de fuentes tsunamigénicas se llevó a cabo a partir de consultas bibliográfica. El informe de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) 2018 provee una compilación de fuentes verosímiles de tsunamis para el Océano Pacífico y Mar Caribe y su potencial

afectación en las costas de América Central. Este documento detalla la existencia de cinco zonas tsunamigénicas para la Costa Pacífico siendo Guanica 2 y 3 las más cercanas a Corinto. Por otra parte, JICA (2006) propuso parámetros para simular el sismo-tsunami ocurrido en Nicaragua en 1992, uno de los más destructivos en la historia reciente del país. Estos parámetros fueron posteriormente modificados por Argüello (2016) e integrados a la fuente sísmica GCMT 1992. Debido a su proximidad y la relevancia histórica, las fuentes Guanica 2, Guanica 3 y GCMT 1992 fueron utilizadas para el desarrollo del presente estudio.

### **3.1.2. Datos batimétricos y topográficos**

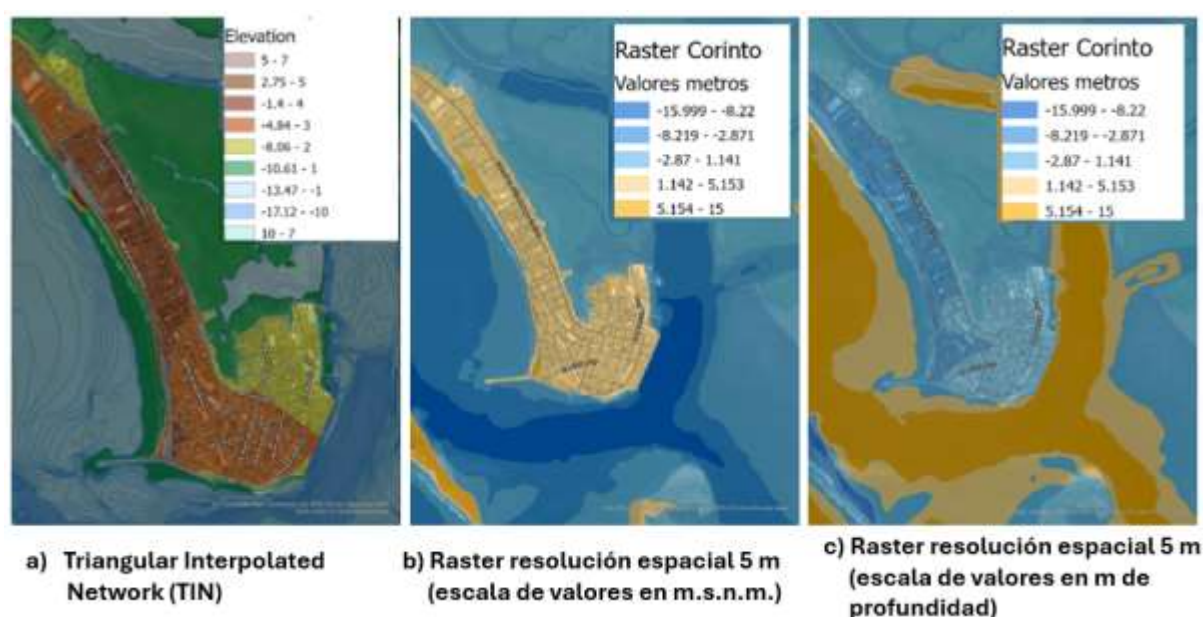
La información batimétrica incluyó tres sets de datos de diferentes escalas. Los datos de escala global y regional sobre el fondo marino (con resolución espacial de 1,800 m y 900 m respectivamente) se obtuvieron en formato raster a través del portal de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans, <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data>) en 2024. La batimetría local o relieve de playa, se obtuvo de la Carta Náutica de Corinto (escala 1:12,500), actualizada por INETER en 2012. Estos datos se encuentran en formato vector, presentan una resolución espacial de 6 m; y abarca un área de 36 de km<sup>2</sup>, extendiéndose hacia el mar aproximadamente 3.5 km con respecto a la línea de costa. La topografía de superficie se obtuvo del estudio “Estrategias Regionales de Desarrollo Humano Urbano-turístico” (INTUR, 2001), el cual cuenta con curvas de nivel a intervalos de 2 m de elevación en formato vector.

Para generar un modelo de relieve continuo playa-superficie se implementaron métodos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) bajo el entorno del software ArcGIS 10.5 (ver Figura 14). Los datos batimétricos (profundidades expresadas en m), se transformaron a elevaciones expresadas en metros sobre el m.s.n.m. Posteriormente, la batimetría se combinó con la topografía de superficie, interpolando una primera aproximación de relieve continuo en formato

TIN (Triangular Interpolated Network). El dato TIN se transformó a formato raster, con una resolución espacial de 6 m. Dado que el modelo computacional opera con valores positivos para estimar la extensión de la inundación, se requiere una transformación de los datos topográficos y batimétricos mediante la inversión de signos, a fin de asegurar la coherencia en los resultados de la simulación. La información se proyectó al sistema de coordenadas geográficas GCS WGS 1984 y el dato resultante se exportó a formato ASCII.

**Figura 14.**

*Flujo de trabajo para elaboración de modelo de relieve continuo playa-superficie*



*Nota.* Implementación de métodos de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en ambiente ArcGIS 10.5. a) Integración de datos topográficos y batimétricos en formato TIN, b) Transformación de topografía y batimetría a formato raster, c) transformación de los datos topográficos y batimétricos mediante la inversión de signos para el cálculo de niveles de inundación. Elaboración propia.

### 3.2. Simulación numérica

El presente estudio se desarrolló implementando el software ComMIT (<https://nctr.pmel.noaa.gov/ComMIT/>). Este programa seleccionado por ser de uso libre y código

abierto, características que permiten replicar el estudio en otros sitios de interés o analizar el potencial impacto de otros eventos. Cabe destacar que ComMIT se especializa en modelar tsunamis de rompimiento inmediato. Para simular escenarios originados por rompimientos lentos y de larga duración, se requiere calibrar las condiciones iniciales de forma empírica.

### **3.2.1. Ajuste de datos e ingreso de condiciones iniciales**

En este trabajo se modelaron escenarios a partir de tres fuentes tsunamigénicas Guanica 2, Guanica 3 y GCMT 1992. Para la simulación, ComMIT requirió los parámetros de hipocentro, rumbo, inclinación, dimensiones, cantidad de deslizamiento y mecanismo de falla. Debido a que ComMIT se especializa en modelar tsunamis por rompimientos inmediatos, algunos parámetros deben calibrarse de forma empírica para simular eventos producto de rompimientos lentos y de larga duración. Tal fue el caso de la fuente GCMT 1992, que requirió implementar un ajuste propuesto por Argüello (2016) en el desplazamiento de falla para replicar un escenario similar al ocurrido durante el tsunami de 1992.

### **3.2.2. Simulación numérica del tsunami extremo**

De todas las fuentes modeladas, GCMT 1992 fue seleccionada para desarrollar el caso de estudio por presentar parámetros para la simulación de un tsunami extremo, incluyendo alturas de olas, velocidad de propagación y distancias máximas de inundación.

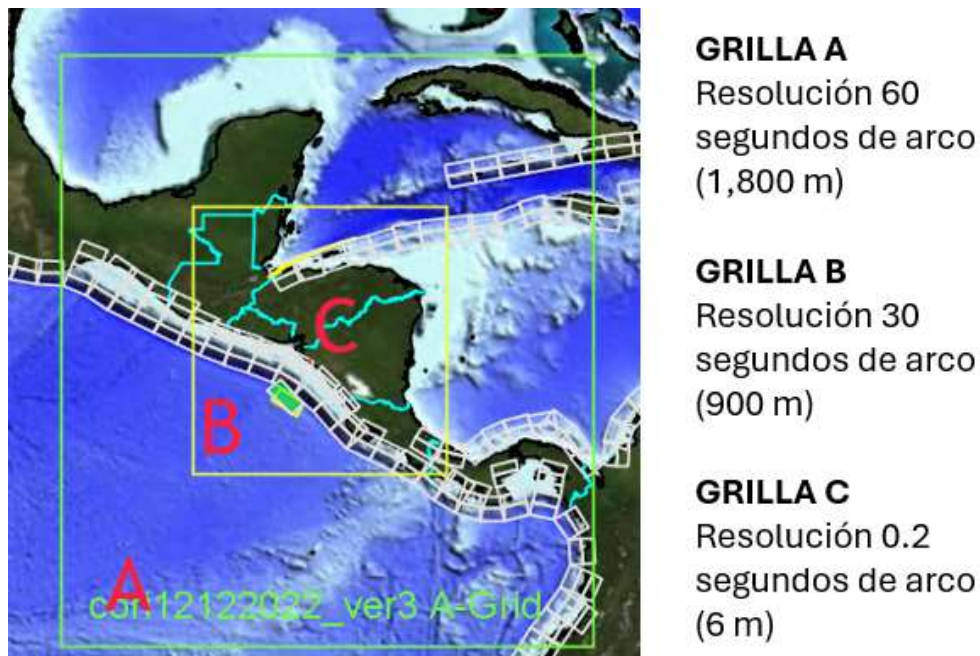
Para dicha simulación, primero se anidaron las grillas de batimetrías de distintas resoluciones. (Ver figura 15). Este proceso permitió obtener una representación detallada del fondo marino, mejorando la resolución, continuidad y precisión de los datos para el sitio de interés. Todas las grillas cumplieron con la condición de estabilidad para tiempos de simulación Courant–Friedrichs–Lewy (CFL), donde el dominio de dependencia numérico es mayor que el dominio de

dependencia físico. Esto garantizó que los procesos de simulación fueran estables, evitando interrupciones o errores por falta de continuidad espacial en los datos.

Posteriormente, se introdujeron los parámetros de la fuente tsunamigénica GCTM 1992, utilizando el módulo “Costum Propagation Run” (Figura 16), considerando el ajuste introducido por ajuste propuesto por Argüello (2016) en el desplazamiento de falla. Por último, se configuraron los parámetros de simulación tales como tiempo de simulación, mínima amplitud considerada en mar abierto, mínima profundidad en mar abierto y mínima profundidad de inundación (ver Figura 16). También se configuró el coeficiente de fricción de Manning. En este caso, el programa ComMIT utiliza el coeficiente de fricción elevado al cuadrado para aproximar la dispersión de la ola de tsunami en costa. El coeficiente se fijó en 0.025, correspondiente a la categoría de ríos y mares.

### Figura 15.

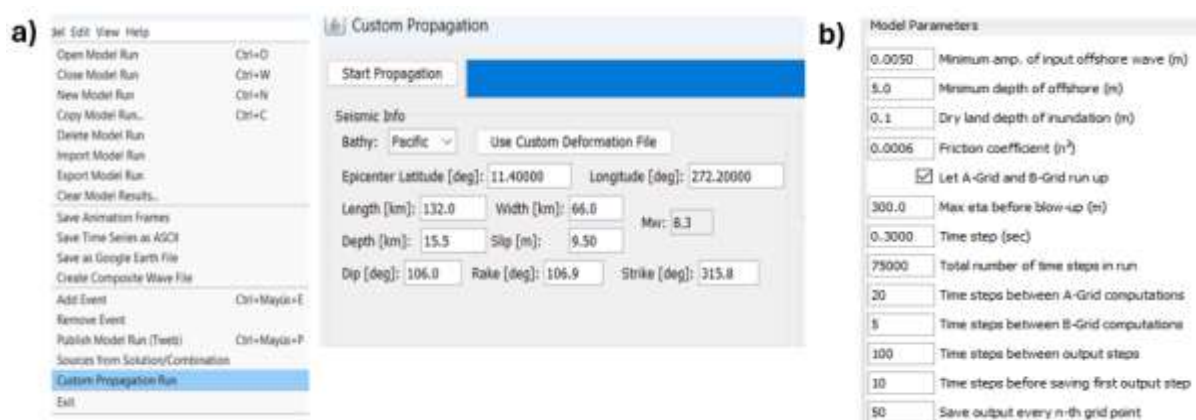
*Método de anidación de grillas batimétricas utilizando el software ComMIT*



*Nota.* Elaboración propia

**Figura 16.**

*Configuración de simulación numérica de tsunamis utilizando el software ComMIT*



*Nota.* a) Introducción de fuentes tsunamigénicas, b) Parámetros de modelación. Elaboración propia

### 3.3. Cálculo de fuerzas actuantes sobre estructuras de evacuación ante tsunamis

De la simulación del tsunami extremo se obtuvieron las alturas de olas, velocidad de flujo y distancias máximas de inundación. Estos datos sirvieron para el cálculo de las fuerzas actuantes sobre y otros parámetros relevantes para el diseño de estructuras tsunami resistentes de una planta. Los cálculos incluyeron altura de estructuras, fuerza hidrostática, fuerza hidrodinámica, fuerza de fluidos, fuerza de impulso, fuerza de impacto por escombros, velocidad máxima de flujo, distancia del calado de contenedores y de formación de diques por escombros. Las ecuaciones para los cálculos se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2.**

*Ecuaciones para el cálculo de fuerzas actuantes sobre infraestructuras de mitigación*

Nombre	Ecuación	No.
	$h_{max} = 1.3R^* - Z_w$	
	donde:	
Altura de la estructura	$h_{max}$ es la altura máxima de estructura de mitigación	(1)
	$R^*$ es la elevación máxima del alcance de la inundación	
	$Z_w$ es la altura de la obra sobre el nivel del mar	

Fuerza hidrostática	$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g b h_{max}^2$ <p>donde:</p> <p><math>F_h</math> es la fuerza hidrostática</p> <p><math>\rho_s</math> es la densidad del agua con sedimento (<math>1200 \text{ kg/m}^3</math>),</p> <p><math>g</math> es la gravedad</p> <p><math>b</math> es el ancho del muro de la obra</p> <p><math>h_{max}</math> es la altura máxima de estructura de mitigación</p>	(2)
Fuerza hidrodinámica	$(hu^2)_{max} = gR^2 \left( 0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left( \frac{z}{R} \right)^2 \right)$ <p>donde:</p> <p><math>(hu^2)_{max}</math> es la fuerza hidrodinámica</p> <p><math>g</math> es la gravedad</p> <p><math>R</math> es Altura máxima de inundación (RUNUP)</p> <p><math>z</math> es</p>	(3)
Fuerza de fluido	$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{max}$ <p>donde:</p> <p><math>F_d</math> es la fuerza de fluido</p> <p><math>\rho_s</math> es la densidad del agua con sedimento (<math>1200 \text{ kg/m}^3</math>),</p> <p><math>C_d</math> es coeficiente de arrastre</p> <p><math>B</math> es el ancho de la estructural en plano normal a la dirección de flujo</p> <p><math>(hu^2)_{max}</math> es momento de flujo por unidad de masa</p>	(4)
Fuerzas por impulso	$F_s = 1.5 F_d$ <p>donde:</p> <p><math>F_s</math> es fuerza de impulso</p> <p><math>F_d</math> es fuerza hidrodinamica</p>	(5)

Fuerza por impacto de escombros	$F_i = C_m u_{max} \sqrt{km}$ <p>donde:</p> <p><math>F_i</math> es la fuerza por impacto de escombros</p> <p><math>C_m</math> es coeficiente de masa añadida</p> <p><math>U_{max}</math> es velocidad maxima del flujo que lleva escombros</p> <p><math>k</math> es rigidez efectiva de los escombros</p> <p><math>m</math> es la masa de los escombros</p>	(6)
Velocidad máxima de flujo	$u_{max} = \sqrt{(2gR(1 - (\frac{z}{R})))}$ <p>donde:</p> <p><math>U_{max}</math> es la velocidad máxima de flujo</p> <p><math>g</math> es</p> <p><math>R</math> es</p> <p><math>z</math> es</p>	(7)
Distancia del calado del contenedor	$d = \frac{W}{\rho g A_{box}}$ <p>donde:</p> <p><math>d</math> es la distancia de calado del contenedor</p> <p><math>W</math> es el peso del escombros</p> <p><math>\rho</math> es del agua incluyendo sedimento (<math>1200 \text{ kg/m}^3</math>),</p> <p><math>g</math> es la gravedad</p> <p><math>A_{box}</math> es el área Paralela al agua</p>	(8)
Fuerza por diques por escombros en el agua	$F_{dm} = F_d * (\frac{B_d}{B_e})$ <p>donde: <math>B_d</math> ancho del elemento considerado (ancho típico de 12 metros)</p> <p>donde <math>B_e</math> ancho de la estructura</p>	(9)

*Nota:* Ecuaciones tomadas de documento Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis (p. 63-87). Por FEMA, 2019.



## CAPITULO 4. RESULTADOS

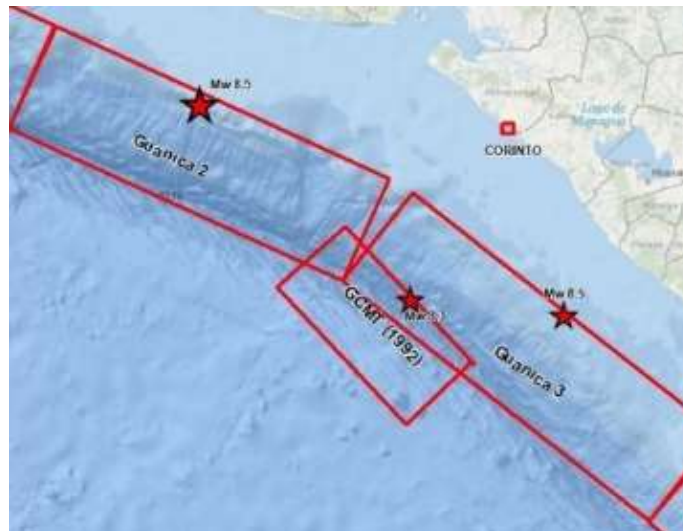
### 4.1. Caracterización de fuentes tsunamigénicas, batimetría y topografía

#### 4.1.1. Fuentes tsunamigénicas

Existen pocos registros sobre sismos generadores de tsunamis en América Central. Los mayores tsunamis registrados en la región fueron causados por los terremotos de Nicaragua, 1992 (7.6 Mw) y El Salvador, 2012 (7.3 Mw), los cuales generaron runups de 10 m y 6 m respectivamente (Satake et al., 1993; Barrero et al., 2014). Debido a su proximidad y la relevancia histórica, las fuentes Guanica 2, Guanica 3 y GCMT 1992 fueron seleccionadas para el desarrollo del presente estudio. A partir de ellas se simularon escenarios con el fin de identificar el más extremo y posteriormente derivar parámetros que faciliten el cálculo de las fuerzas actuantes sobre obras de mitigación. Dichas fuentes identificadas se detallan en la Figura 17 y la Tabla 3.

**Figura 17.**

*Fuentes tsunamigenéticas cercanas al casco urbano de Corinto*



*Nota.* Elaboración propia

**Tabla 3.***Descripción de fuentes tsunamigénicas cercanas a Corinto*

Fuente	Lon. (o)	Lat. (o)	L (km)	A (km)	Buza- miento (°)	Angulo disloca- ción (°)	Rumbo (°)	Desliza- miento (m)	Profun- didad (Km)	Mw
GUANICA 2	270.83	12.64	259	80	20.00	90.00	294.00	5.00	20.00	8.5
GUANICA 3	273.19	11.30	276	80	20.00	102.00	308.00	5.00	20.00	8.5
GCMT 1992	272.20	11.40	132	66	9.60	106.90	315.80	9.50	15.50	8.3

*Nota.* Guanica 2 y Guanica 3 tomadas de Peligro de tsunami en América Central: eventos a lo largo de la historia y posibles fuentes (p. 11). Por COI, 2018. GCTM 1992 tomada de W phase inversion analysis and tsunami simulation for tsunami warning for large earthquake (Mw>7.0) in Nicaragua (p.35). Por Argüello (2016)

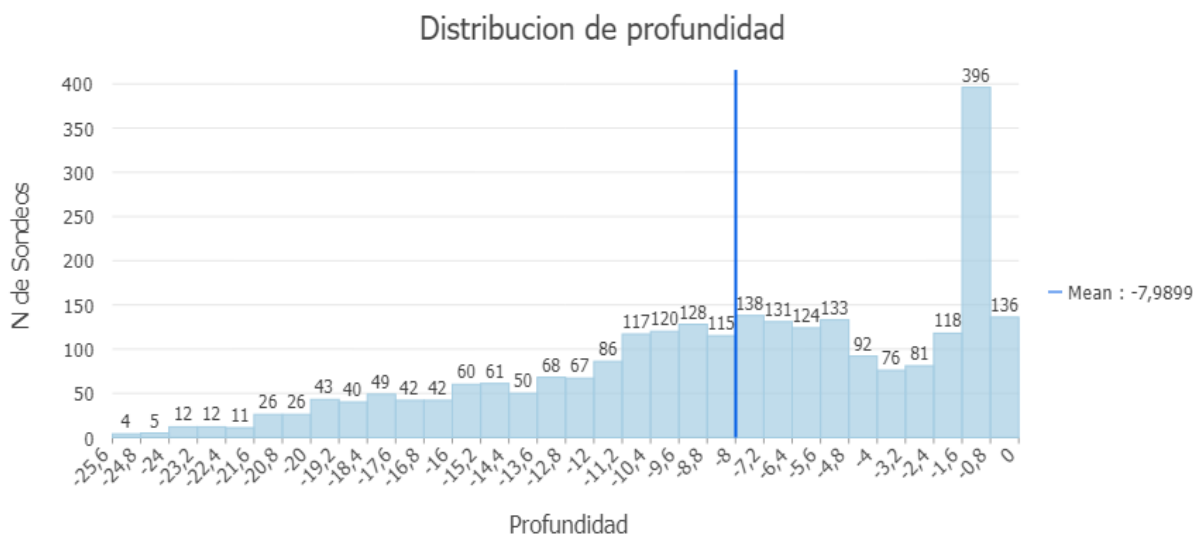
Según el catálogo sísmico, las fuentes seleccionadas presentan mecanismo inverso, son de gran magnitud (>8 Mw) y de profundidad somera ( $\leq 20$  km). Se considera que Guanica 2 y Guanica 3 son las fuentes tsunamigénicas máximas creíbles y esperadas para la región (COI, 2018) y las más peligrosas debido a su proximidad (Álvarez-Gómez et al., 2013). Por su parte, GCTM 1992 fue propuesta por Argüello (2016) a partir de una adaptación de JICA (2006), fuente de referencia para el tsunami de Nicaragua, 1992. Las simulaciones realizadas en el presente estudio permitieron identificar que Guanica 3 y GCMT 1992 generan escenarios similares, siendo GCMT 1992 la que simula las condiciones más extremas, con una mayor llanura de inundación (ver acápite 4.2. Resultados de las simulaciones numéricas). Por tal razón, GCTM 1992 fue seleccionada para el cálculo de fuerzas actuantes sobre infraestructura de mitigación.

#### 4.1.2. Características batimétricas y topográficas

La batimetría frente a las costas de Corinto alcanza profundidades máximas de hasta 25.6 m, pero su rango promedio fluctúa entre 5 y 11 m, con una media 8 m (ver Figura 18). En general, las pendientes frente a la costa y sus transiciones a superficie son suaves, de 2 a 4 grados de inclinación. Este relieve marino contribuye a disminuir la velocidad de propagación de los tsunamis, pero provoca un aumento en el tamaño de olas (ver Figura 2). Sin embargo, en las zonas del canal (exterior e interior) y de dársenas, los constantes dragados han incrementado la profundidad de la batimetría. Bajo este contexto, los tsunamis se propagan a mayor velocidad, con alturas de menor tamaño (ver Figura 2) y son capaces de propagarse aguas arriba por ríos y canales (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2023) (ver Figura 19).

**Figura 18.**

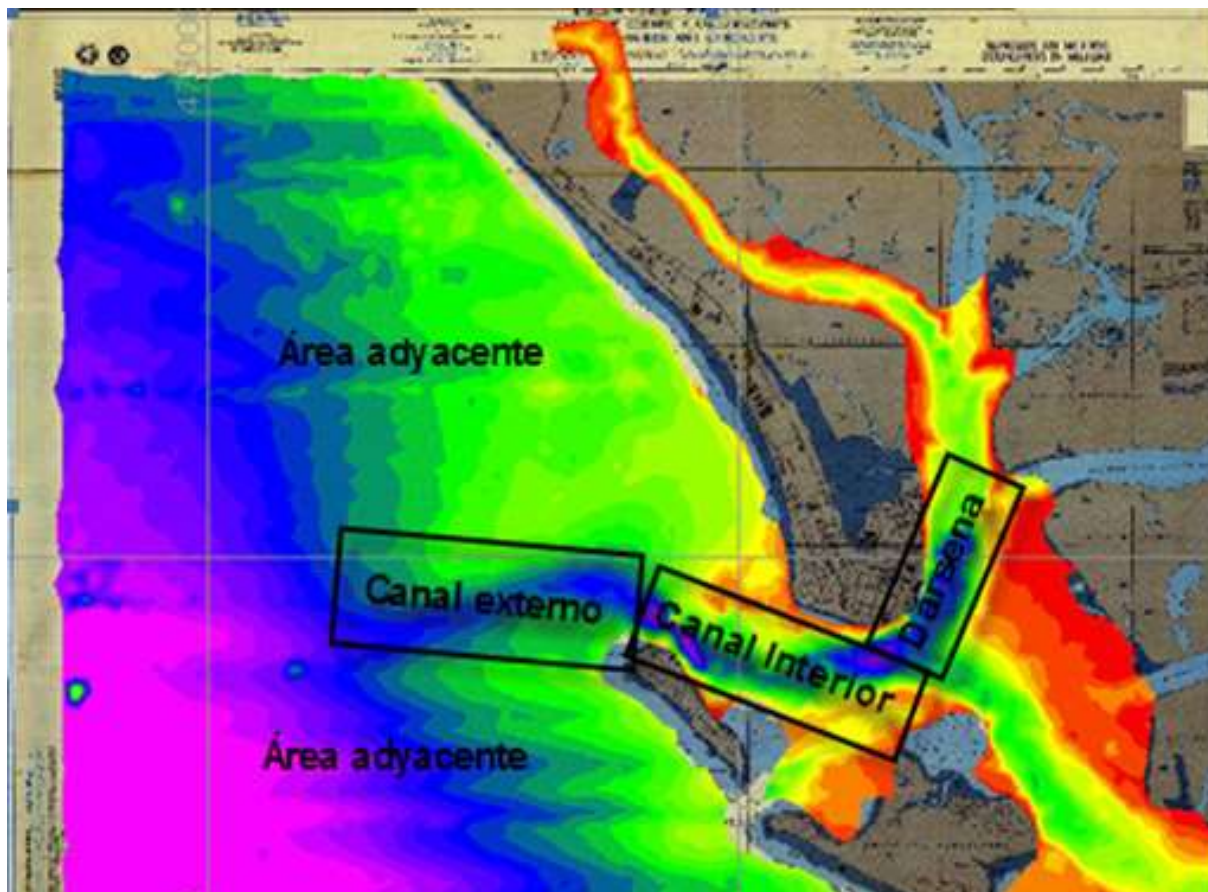
*Distribución de profundidades de sondeo batimétrico en Corinto*



*Nota.* Basado en proyecto Actualización de Cartas Náuticas. Por INETER (2010)

**Figura 19.**

*Levantamiento batimétrico en Corinto*



*Nota.* Basado en proyecto Actualización de Cartas Náuticas. Por INETER (2010)

La topografía de superficie es plana con pendientes promedio de 0.2 grados, con mínimas y máximas de 1.7 y 3 grados respectivamente. Las elevaciones en el casco urbano fluctúan de 0 a 7 m.s.n.m. Dada las condiciones topográficas, Corinto tiende a sufrir inundaciones por marejadas, por lo que se han construido muros de rocas a lo largo de la costa con alturas de hasta 3 m.s.n.m. (ver Figura 20)

**Figura 20.**

*Topografía de superficie en la ciudad de Corinto*



*Nota.* Basado en Estrategias Regionales de desarrollo urbano-turístico, planes maestros, para las regiones de pacifico norte, San Juan del Sur, y Atlántico sur, republica de Nicaragua . Por INTUR (2001)

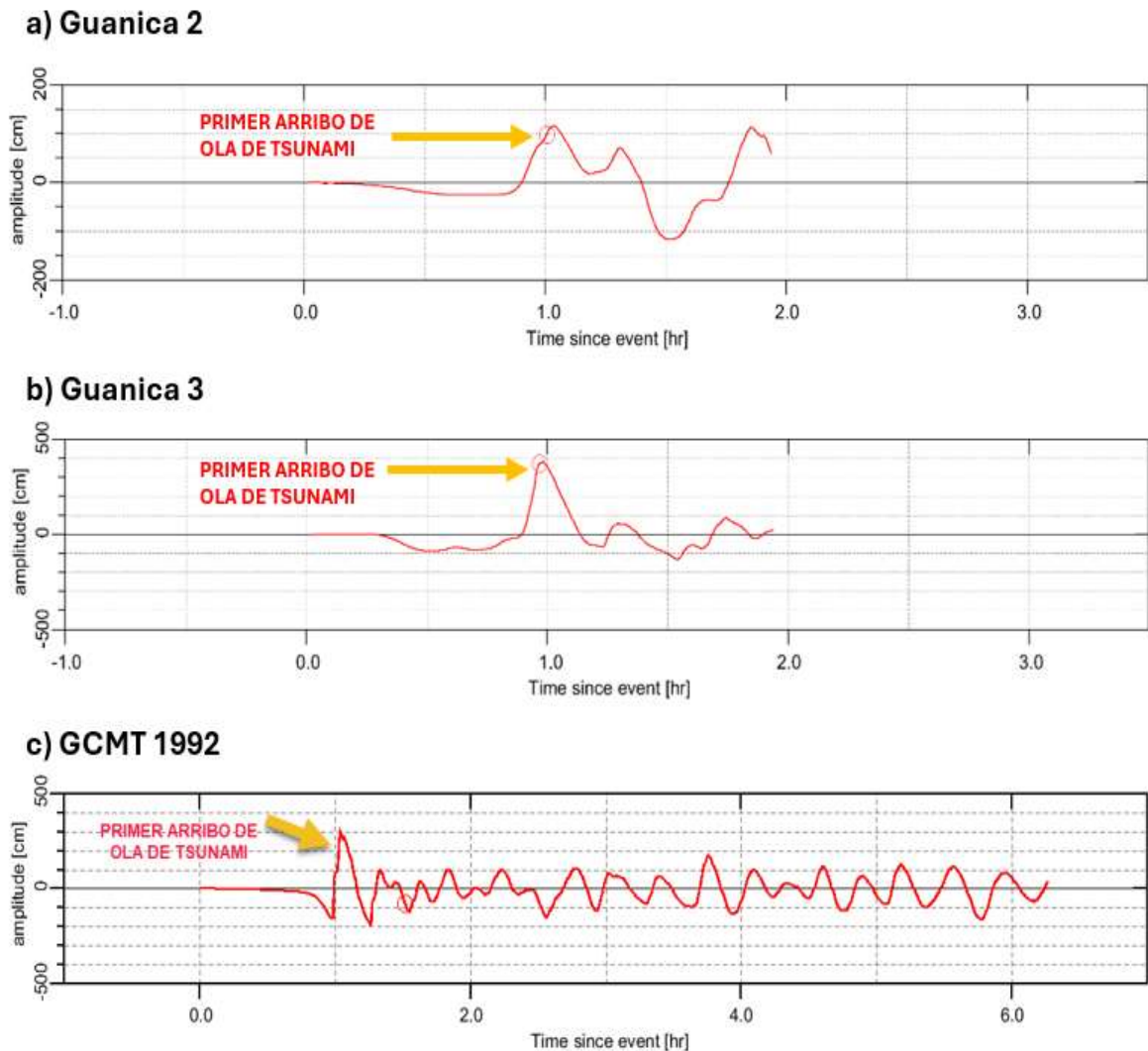
Según la modelación de las distintas fuentes tsunamigénicas, los tiempos de arribo de las olas fueron similares, presentando valores de 50 minutos, 1 hora y 1 hora y 10 minutos para Guanica 3, Guanica 2 y GCMT 1992, respectivamente (ver Figura 21). Todos los escenarios sugieren tiempos limitados para la evacuación de la población, especialmente porque Paso Caballos es la única conexión terrestre con el resto del país. Esto subraya la necesidad de que los tomadores de decisiones actúen rápidamente en eventos críticos y así como también generar infraestructuras para la evacuación oportuna de la población

## 4.2. Resultados de las simulaciones numéricas

### 4.2.1. Tiempos de arribo de olas de tsunamis

**Figura 21.**

*Tiempo de arribo de olas para fuentes tsunamigénicas cercanas a Corinto*



*Nota.* a) Guanica 2, b) Guanica 3 y c) GCMT 1992. Guanica 2 y 3 son elaboración propia. GCMT 1992 tomado de “W phase inversion analysis and tsunami simulation for tsunami warning for large earthquake ( $M_w > 7.0$ ) in Nicaragua” (p. 46), Por Argüello (2016).

#### **4.2.2. Máximas amplitudes de olas de tsunami (runup)**

Los valores de runup presentaron diferencias relevantes para el área de estudio, según las fuentes tsunamigenicas (ver Figura 22). Guanica 2 presentó el valor mínimo de runup, con máximas amplitudes de ola aproximadas a 2 m.s.n.m. Esta fuente sísmica no se considera como crítica para Corinto, pues la llanura de inundación se extiende a lo largo de zonas de costa, no existe afectación en el casco urbano. Guanica 3 y GCMT 1992 presentaron valores similares, alcanzando runups de 3 a 5 m.s.n.m. Para el escenario Guanica 3, las olas rebasaron las cotas de elevación máxima en los barrios Antonio Carvajal, Omar Torrijos y Félix Salgado, inundando 0.39 km<sup>2</sup> (14%) del casco urbano desde la costa hasta el bosque de mangles en su extremo Este. Para el escenario GCMT 1992, la llanura de inundación se extendió a un área mayor, abarcando los barrios Jesús de la Buena Esperanza y El Humito, afectando 0.67 km<sup>2</sup> (24%) del casco urbano. En base a INIDE (2019), se estima que esta zona de inundación afectaría a 185 habitantes de forma directa, además dificultaría cualquier esfuerzo de evacuación vía terrestre. En base a estos resultados, GCMT 1992 destacó como el escenario extremo. Los parámetros runup máximo de 3.42 m.s.n.m. para zonas pobladas afectadas y velocidad máxima de ola de 6.13 m/s fueron utilizados para el cálculo de fuerzas actuantes sobre obras de mitigación (ver Figura 23).



**Figura 22.**

*Amplitudes máximas de olas o runup para escenarios evaluados*

**a) Guanica 2**



**b) Guanica 3**



**c) GCMT 1992**



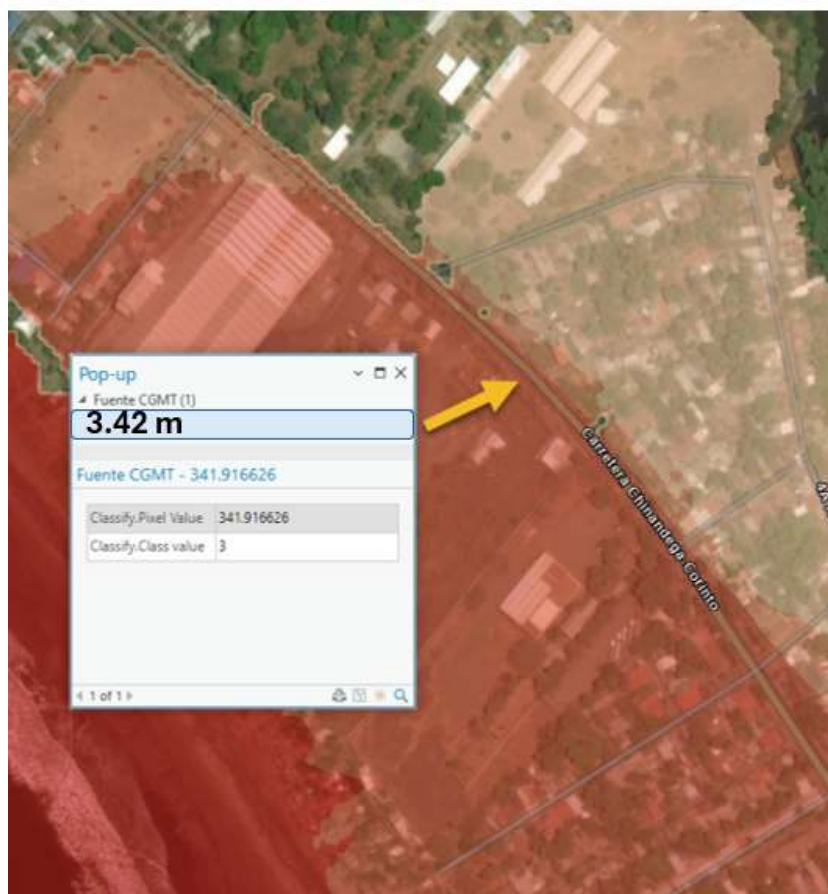
*Nota.* Elaboración propia.



**Figura 23.**

*Parámetros para cálculo de fuerzas actuantes sobre estructuras (GCMT 1992)*

**a) Altura de Runup**



**b) Velocidad máxima**



*Nota.* Basado en escenario GCMT 1992. Elaboración propia

#### 4.3. Cálculo de fuerzas actuantes como parámetros de diseño para construcciones tsunami resistentes

Dada las condiciones del terreno se propone un muro de contención con las siguientes condiciones:

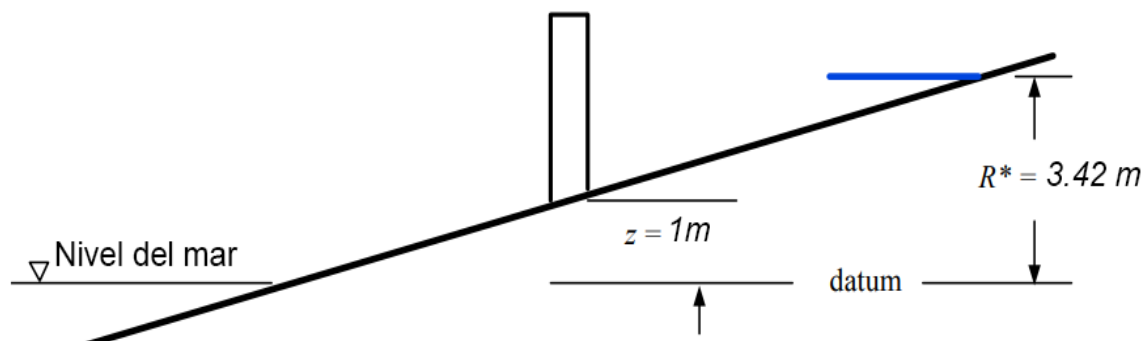
- Ancho de la estructura = 10 m
- Elevación de la estructura = 93 cm aproximadamente 1 m.
- La pendiente del terreno es=  $0.92^\circ$  y no existe variación significativa.
- La altura de alcance máximo de inundación= 341.91 cm o 3.42 m a 365 m de la orilla.
- Tronco = ancho de 8.5 metros con 0.35 metros de diámetro y 450 Kg de masa.
- Contenedor= contenedor de carga (40'L x 8' W x 8-1/2' H ó 12.2 m x 2.44 m x 2.59 m) de 30,000 kg (30 toneladas).

##### 4.3.1. Altura de estructura

Plantear una altura adecuada para cualquier estructura es de vital importancia. Se recomienda que la altura de la estructura  $R$  debe ser 30% mayor que la altura de alcance máximo o  $R_{unup}$  (FEMA, 2008), dicho valor es calculado mediante la simulación numérica de tsunami, esto para compensar la amplificación local y la incertidumbre de proveniente de la misma ver en la siguiente figura.

**Figura 24.**

*Boceto para de definición para cálculos*



*Nota.* Elaboración propia

Datos de la elevación máxima de alcance de inundación de tsunami  $R^*$  de 341.91 cm, podemos calcular la altura  $h_{max}$  de la estructura de mitigación con la fórmula (4) mencionada anteriormente en la pag 44

$$h_{max} = 1.3R^* - Z_W =$$

$$h_{max} = 1.3(341.91)cms - 100cms = 344.48 cms$$

$$h_{max} = 3.5 m$$

#### 4.3.2. Fuerzas hidrostáticas

$$F_h = \frac{1}{2} \rho_s g b h_{max}^2$$

$$F_h = \frac{1}{2} \left( 1200 \frac{Kg}{m^3} \right) * \left( 9.81 \frac{m}{seg^2} \right) * 10m * (3.5m)^2$$

$$F_h = 725.16KN$$

#### 4.3.3. Fuerzas hidrodinámica.

Para el cálculo de la fuerza hidrodinámica debe de tomarse en cuenta el valor máximo de  $hu^{^2}$  en el lugar, este se puede calcularse usando la Ecuación 6.

$$(hu^{^2})_{max} = gR^2 \left( 0.125 - 0.235 \frac{Z}{R} + 0.11 \left( \frac{Z}{R} \right)^2 \right)$$

Con  $z = 1 m$ ,  $1.3R^* = R = 4.44 m$ ,  $g = 9.81 \frac{m}{seg^2}$ .

$$\left( hu^{^2} \right)_{max} = \left( 9.81 \frac{m}{seg^2} \right) * (4.44m)^2 * \left( 0.125 - 0.235 * \left( \frac{1}{4.44} \right) + 0.11 \left( \frac{1}{4.44} \right)^2 \right)$$

$$\left( hu^{^2} \right)_{max} = 15.02 m^3/seg^2$$

Entonces la fuerza del fluido se calcula con la ecuación 5 tomando que  $C_d=2$

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{max}$$

$$F_d = \frac{1}{2} * \left( 1200 \frac{Kg}{m^3} \right) * 2 * 10m * 15.02 m^3/seg^2$$

$$F_d = 180KN$$

#### 4.3.4. Fuerzas por impulso

La fuerza de impulso para esta condición sería 1.5 veces la fuerza hidrodinámica, este valor se calcula según la Ecuación 9.

$$F_s = 1.5 F_d$$

$$F_s = 1.5 * (180KN)$$

$$F_s = 270KN$$

#### 4.3.5. Fuerzas por impacto de escombros

La velocidad máxima del flujo puede estimarse usando  $R = 4.44 m$  y el valor de  $u_{max}$  proveniente de la simulación numérica o de la ecuación 7 en la ecuación 8

$$F_i = C_m u_{max} \sqrt{km}$$

Para el valor de velocidad máxima  $u_{max}$  esta puede ser calculada mediante el uso de la ecuación 7 o mediante el uso de la velocidad calcula de la simulación numérica

$$u_{max} = \sqrt{(2gR(1 - (\frac{z}{R}))}$$

$$u_{max} = \sqrt{(2 * 9.81 \frac{m}{seg^2} * 4.44m(1 - (\frac{1}{4.44}))}$$

$$u_{max} = 8.22 \frac{m}{seg}$$

Para el cálculo de fuerza de impulso por escombros proveniente de la velocidad calculada por la ecuación 7 es:

$$F_i = 2 * 8.22 \frac{m}{seg} \sqrt{(2.4 * 10^6 N/m * (450Kg))}$$

$$F_i = 540.3KN$$

La fuerza de impulso calculada por la velocidad calculada por la simulación numérica es:

$$F_i = 2 * 6.13 \frac{m}{seg} \sqrt{(2.4 * 10^6 N/m * (450Kg))}$$

$$F_i = 403KN$$

Tomando en consideración que los valores de  $u_{max}$  provenientes de la simulación numérica toman en cuenta otros factores, así como también el terremoto máximo esperado, la fuerza total al momento del impacto puede determinarse conservadoramente mediante la combinación de esta fuerza de impacto con la fuerza hidrodinámica determinada anteriormente:

$$F_i + F_d = 403KN + 180KN$$

$$F_i + F_d = 583KN$$

para calcular la fuerza de impacto causada por el contenedor de carga, se tiene que calcular la distancia  $d$  de calado del contenedor a partir de la formula:

$$d = \frac{W}{\rho g A_{box}}$$

$$d = \frac{30000kg * 9.81 \frac{m}{seg^2}}{1200 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{seg^2} * (12.2m * 2,44m)}$$

$$d = 0.84 m$$

La velocidad máxima de flujo con un calado  $d = 0.84 m$ , puede encontrarse en la en el lugar  $\zeta = z/R = 0.22$  y la profundidad de flujo  $d/R = 0.18$  el cual según el **grafico 2** muestra el valor de  $u_{max}$  a lo largo de curva limite  $\zeta = 0.31$ , por lo tanto, la velocidad máxima de flujo es:

$$u_{max} = 0.31 \sqrt{2 * 9.81 \frac{m}{seg^2} * 4,44m}$$

$$u_{max} = 2.89 \frac{m}{seg}$$

La fuerza de impacto causada por un contenedor de carga se calcula con la ecuación 9

$$F_i = C_m u_{max} \sqrt{km}$$

$$F_i = 2 * 2.89 \frac{m}{seg} \sqrt{2.4 * 10^6 N/m * 3000Kg}$$

$$F_i = 1550KN$$

La fuerza total al momento del impacto de un contenedor de carga puede determinarse de manera conservadora combinando esta fuerza de impacto y la con la fuerza hidrodinámica

$$F_i + F_d = 1550KN + 180KN$$

$$F_i + F_d = 1730 KN$$

#### 4.3.6. Fuerzas por diques por escombros en el agua

El efecto de diques por escombros puede ser calculados por la ecuación 10, que se obtiene a partir de la fuerza hidrodinámica multiplicada por el ancho recomendado de 12m según (FEMA, 2008)

$$F_{dm} = 180KN * \left(\frac{12\ m}{10\ m}\right)$$

$$F_{dm} = 216\ KN$$

Dado los resultados obtenidos en los cálculos en base a la simulación de evento extremo se puede prever que cualquier estructura de mitigación deberá tener una altura por encima de los 3.5 metros en base a la consideración de un 30% de excedencia.

Al analizar los resultados de las fuerzas actuantes como son las fuerzas hidrostáticas, hidrodinámicas y de impulso se puede observar que las fuerzas hidrodinámicas y de impulso son menores a la fuerza hidrostática debido a que el modelo digital de terreno considera un muro de roca existente en la ciudad de Corinto.

La interacción con objetos en movimiento (escombros y contenedores) puede ser un factor decisivo en el rendimiento de las estructuras de mitigación, tal como se puede observar en los resultados del ejemplo propuesto, adicionalmente se debe de considerar la obstrucción de dichos escombros frente a la estructura, es por esto que deben considerarse otras medidas que ayuden al rendimiento de la estructura (rejillas o barreras flotantes).

## **CAPITULO 5. CONCLUSIONES**

La metodología FEMA es de utilidad para el contexto nacional, sobre todo en sitios como Corinto, caracterizadas por una amenaza alta ante tsunamis. Factores como el reducido tiempo de respuesta tras un sismo-tsunami y la alta exposición de la población debido a topografía plana y una única ruta terrestre de evacuación refuerzan la necesidad de diseñar estructuras de mitigación que permitan reducir el riesgo.

El cálculo de fuerzas actuantes de los tsunamis sobre estructuras es posible si se cuenta con fuentes tsunamigénicas caracterizadas de manera detallada, así como también de datos de topografía y batimetría que permitan el ensayo mediante simulaciones numéricas sobre el máximo evento de tsunami esperado para la zona de estudio.

La simulación de tsunamis puede desempeñar un papel clave en la gestión del riesgo. Estas metodologías permiten en corto tiempo, estimar parámetros para el diseño de estructuras de mitigación (runup, la velocidad máxima del flujo y la profundidad de inundación), contribuyendo a mejorar las normativas de construcción para zonas especiales.



## **CAPITULO 6. RECOMENDACIONES**

Se recomienda promover es el estudio para caracterización de fuentes sísmica tsunami generadoras ya que a pesar de que los resultados dan como el máximo terremoto esperado GCMT (1992), no significa que este sea el máximo evento esperado para Nicaragua.

Si bien los datos de batimetría y topografía utilizados en el estudio son de alta resolución (2 a 5 metros respectivamente), estos datos se encuentran desactualizados. Se recomienda la actualización de datos topográficos y batimétricos en zonas costeras, para modelar escenarios más confiables en relación al Runup, velocidad máxima de olas y altura de inundación.

Se recomienda realizar simulación numérica tsunami con otros programas que tomen en mecanismos de ruptura lenta y de larga duración como complemento a los escenarios generados en el presente estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arcas, D. A. (2010). A tsunami forecast model for Crescent City, California. NOAA OAR Special Report, PMEL Tsunami Forecast Series, Vol. 2. 112 p.
- Argüello, G. (2016). *W phase inversion analysis and tsunami simulation for tsunami warning for large earthquake ( $M_w > 7.0$ ) in Nicaragua*. Disaster Management Policy Program. Tesis de maestria. National Graduate Institute for Policy Studies (GRIPS). International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IISSE). Japan. 106 p.
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental (2018). *Peligro de tsunami en América Central: eventos a lo largo de la historia y posibles fuentes*. San José, Costa Rica, 23 y 24 de junio de 2016. París, UNESCO.,  
[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366303\\_spa.locale=en](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000366303_spa.locale=en)
- FEMA (2019). *Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis*. Third Edition. (FEMA P-646).,  
[https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema\\_rsl\\_guidelines-for-design-of-structures-for-vertical-evacuation-from-tsunamis\\_050925.pdf](https://www.fema.gov/sites/default/files/documents/fema_rsl_guidelines-for-design-of-structures-for-vertical-evacuation-from-tsunamis_050925.pdf)
- Hazards Data Manager, NOAA National Centers for Environment. (1974). *NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database, 2100 BC to Present*.
- INETER (2023). *Catálogo de sismos y volcanes de Nicaragua*. INETER, Dirección de Geología y Geofísica. Managua.
- INETER-CATAC (2017). *Guía de usuario*. INETER-CATAC. Managua.
- INETER-Geofísica (2005). *\*Tsunamis en Nicaragua\**.  
<https://webserver2.ineter.gob.ni/tsunami/tsu-nic92.html>

INETER (2006). *Estudio para el establecimiento de mapas básicos y mapas de amenaza para SIG en la República de Nicaragua*, PASCO.

INTUR (2001). *Estrategias regionales de desarrollo urbano-turístico y planes maestros para las regiones del Pacífico norte, San Juan del Sur y Atlántico sur*. Managua, CEURA S.A.

ITIC. (2021). *Tsunami – Las grandes olas.*, <https://Tsunami: the great waves - UNESCO Digital Library>

Molina, E. (1997). *Tsunami Catalogue for Central América 1539-1996*), Report No.II 1-04, Institute of Solid Earth Physics, Univ. Bergen, Norway, July 1997, Project: Reduction of Natural Disasters in Central America, Earthquake Preparedness and Hazard Reduction

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2023, abril 10). *Tsunami inundation*. <https://www.noaa.gov/jetstream/tsunamis/tsunami-inundation>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2024, septiembre 10). *NCEI/WDS Global Historical Tsunami Database, 2100 BC to Present.*, <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.hazards:G02151>

Satake, K., Bourgeois, J., Abe, K., Abe, K., Tsuji, Y., Imamura, F., Lio, Y., Katao, H., Noguera, E., Estrada, F. (1993). Tsunami field survey of the 1992 Nicaragua earthquake. *Advancing Earth and Space Science*, 74 (13). 145-157. <https://doi.org/10.1029/93EO00271>

SHOA (1994). *Material didáctico complementario y de consulta para la enseñanza de la geografía chilena*. Chile,

<https://www.preventionweb.net/media/97781/download?startDownload=20250702>

Unidas-CEPAL, Naciones. (1992). *El maremoto de septiembre de 1992 en Nicaragua y sus*

*efectos*, [https://repositorio.cepal.org/entities/publication/413fa4a1-2acc-4cf9-bc81-](https://repositorio.cepal.org/entities/publication/413fa4a1-2acc-4cf9-bc81-2f12bda50f78)

[2f12bda50f78](https://repositorio.cepal.org/entities/publication/413fa4a1-2acc-4cf9-bc81-2f12bda50f78)

## **ANEXOS**

## **Anexo A. Manual de usuario del software ComMIT**

### **Community Model Interface for Tsunami (ComMIT)**

**(Interfaz para la elaboración en comunidad de modelos de tsunamis)**

***Elaborado por el Centro para la Investigación de Tsunamis de la NOAA (NCTR, por sus siglas en inglés)***

#### **introducción**

ComMIT es una interfaz diseñada en torno a MOST (Method Of Splitting Tsunamis), el modelo numérico de tsunamis de la NOAA. ComMIT ha sido diseñado para que pueda ser usado de forma sencilla. Permite difundir los resultados en la comunidad al tiempo que soluciona los problemas asociados con los derechos de propiedad de la batimetría y topografía. ComMIT usa las condiciones iniciales establecidas en una base de datos precalculada sobre la propagación de la onda, tiene una interfaz gráfica intuitiva y sólo requiere de un equipo portátil. En un principio, ComMIT fue desarrollado para los países del océano Índico con el apoyo de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el Organismo de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA). Hasta el día de hoy, más de 325 científicos provenientes de 57 países de todo el mundo han sido formados en esta interfaz y la usan para cartografiar inundaciones.

#### **Requisitos básicos para la instalación**

Para instalar ComMit es necesario tener el software Java. El programa informará al usuario de la versión que necesita. Para actualizar Java, dirigirse a <http://www.java.com>.

## Instalación de ComMIT

**Windows:** Sitúe el archivo instalador ComMIT\_<ver>.exe donde lo desee (lo puede dejar en el escritorio). Para lanzar ComMIT, haga doble clic sobre el archivo ComMIT\_<ver>.exe

**Mac:** Descargue el archivo ComMIT\_<ver>.dmg y haga doble clic para lanzar el archivo instalador de ComMIT. Puede aparecer un mensaje en el que se lea que ComMIT es una aplicación no firmada, en este caso, vaya a *System Preferences*, abra *Security and Privacy* y haga clic sobre *Allow apps downloaded from Anywhere*. Arrastre la aplicación ComMIT a la carpeta *Applications*. Cierre el instalador. Abra la carpeta *Applications* y haga doble clic en ComMIT.

**Linux:** Coloque el archivo ComMIT\_<ver>.jar donde sea conveniente (puede dejarlo en el escritorio). Para lanzar ComMIT, haga doble clic sobre ComMIT.jar. Para ver la información de depuración, introduzca el comando "java -jar ComMIT\_<ver>.jar -d" en la línea de comandos.

En la carpeta de inicio, se creará una carpeta con el nombre "ComMIT". Este directorio contiene todos los archivos instalados por ComMIT. La primera vez que se carga, tarda un minuto en descargar las mallas de prueba en esta carpeta. Si desea cambiar de lugar esta carpeta, ComMIT le pedirá que realice esta acción la próxima vez que lance el programa.

*ComMIT->Preferences* permite elegir al usuario su lugar de trabajo, dónde van a estar las mallas, los archivos de origen, y el archivo ejecutable del MOST. Si el programa no encuentra el archivo ejecutable del MOST, éste le preguntará si desea descargarlo. ComMIT tratará de elegir un archivo ejecutable adecuado para la plataforma del usuario. Es necesario tener conexión a Internet.

## **Análisis rápido**

Para realizar un análisis rápido del Sistema, haga clic en *Model->Open Model Run*, y elija *Crescent*. El mapa de la pestaña *Model Setup* (Configuración de modelo) mostrará *crescent A-Grid* en color verde perfilando Crescent City, California. Haga clic sobre uno de los rectángulos “fuente” de color blanco del mapa, el rectángulo se volverá rojo. Haga clic en el botón *Start Model* situado en la parte superior. ¡Y listo!

Se muestra el registro de información del proceso (*Model output log*) que indica que se está descargando la fuente y el rectángulo rojo cambia a verde. Se crea un archivo de condición inicial en la pestaña *Initial Condition* (Condición inicial). La barra de progreso situada en la parte de arriba de ComMIT muestra que el modelo está siendo ejecutado y se actualizan los intervalos de tiempo. Al hacer clic en la pestaña *Results Animation* (Animación de resultados) mientras se ejecuta el modelo se animan los resultados del modelo.

## **La interfaz de ComMIT**

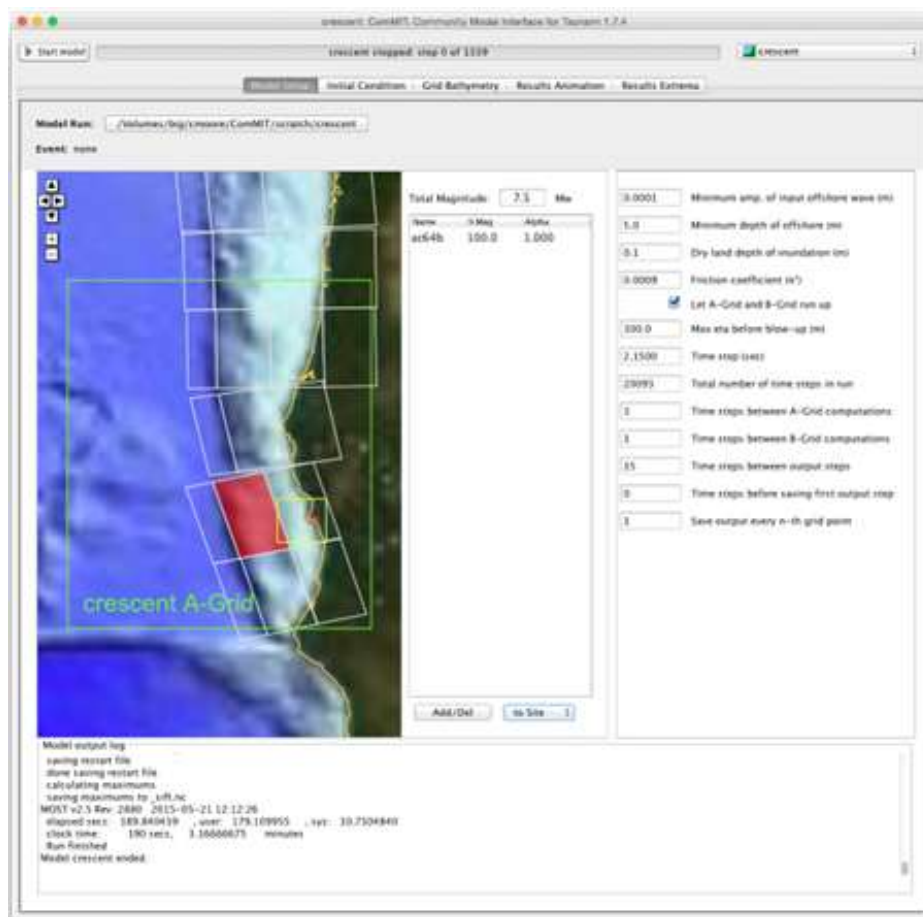
Los modelos de pronóstico de tsunamis (tanto de propagación en aguas profundas como de inundación) necesitan información sobre: (1) la topografía del fondo del mar; (2) las condiciones iniciales y de límite; e (3) información específica sobre el modelo que se va a ejecutar como el intervalo de tiempo y la duración del modelo.

El objetivo de ComMIT es proporcionar una interfaz que permita seleccionar los datos de entrada del modelo (condición inicial, mallas batimétricas, etc.) así como ofrecer una plataforma que muestre los resultados del modelo mediante una interfaz gráfica de usuario. ComMIT ha sido escrito con el lenguaje de programación Java (<http://www.java.com>), para introducir los datos en el modelo y mostrar los resultados del modelo usa el formato de archivo NetCDF lo que hace de ComMIT una plataforma independiente (es decir, puede

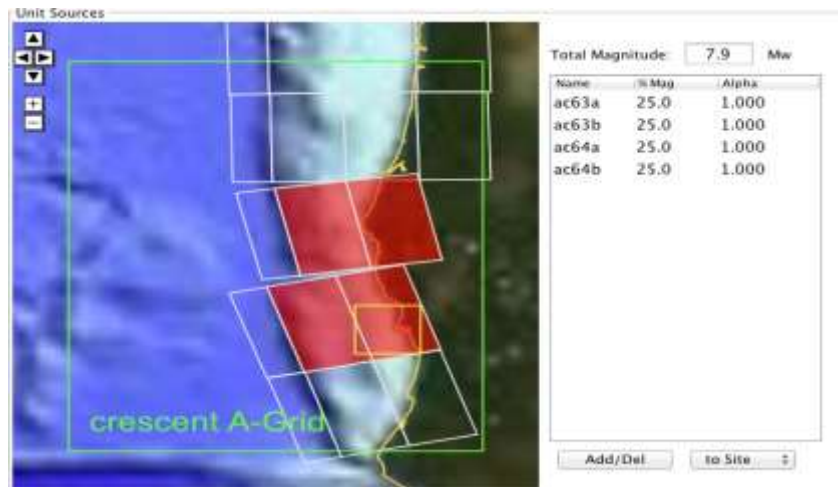


ejecutarse en diferentes plataformas como WINDOWS, Max o UNIX). ComMIT puede ser usado con cualquier modelo informático con la única condición de que los modelos admitan introducir y generar datos en el formato especificado (netCDF).

La interfaz está formada por un botón *Start Model* (Iniciar modelo), una barra de progreso, y el selector *Model Run* (Modelo de ejecución) que se encuentran situados en la parte superior de la interfaz; y de 5 pestañas: *Model Setup* (Configuración de modelo), *Initial Condition* (Condición inicial), *Grid Bathymetry* (Batimetría de la malla), *Results Animation* (Animación de los resultados), y *Results Extrema* (Resultados extremos).



### Pestaña: *Model Setup* (Configuración de modelo)



Muestra la ubicación del modelo de ejecución (*Model Run*) que se encuentra actualmente abierto (*Crescent*, en este caso). El modelo de ejecución (*Model Run*) está formado por tres mallas anidadas: una malla *externa* de baja resolución en color verde (*A-grid*), una malla intermedia de resolución media en color amarillo (*B-grid*), y una malla interna de alta resolución en color rojo (*C-grid*). El modelo de ejecución (*Model Run*) está compuesto de estos tres archivos batimétricos, además de un archivo que contiene los parámetros del modelo (*Model Parameters*). Todo ello se encuentra en una carpeta, para abrirla, haga clic en el botón llamado *Model Run* situado justo encima del mapa.

### Mapa de la Unidad fuente (*Unit Source*)

El mapa también muestra rectángulos blancos que definen un plano de falla sísmica. Estos planos de falla, conocidos como *Unit Sources* (unidades fuente), pueden usarse para forzar el modelo de ejecución (*Model Run*). El usuario puede seleccionar una o más de estas fuentes (*Sources*) y establecer su “peso” ajustando el coeficiente Alfa (*Alpha*) en el cuadro situado a la derecha del mapa. La Magnitud de momento (*Mw*) total puede ajustarse cambiando el coeficiente Alfa al añadir unidades fuente (*Unit Sources*) o al corregir la magnitud directamente.

Para desplazar el mapa, haga clic sobre él y arrástrelo; para acercarlo o alejarlo utilice la rueda del ratón o los botones +/- . La lista desplegable situada debajo del cuadro se puede usar para ir directamente a una región en el mapa y resulta útil para saltar entre fuentes distantes (“to Selected”) y volver a la ubicación del modelo de ejecución (“to Site”). El botón *Add/Del* abre un cuadro de diálogo que permite seleccionar Unit Sources (unidades fuente) por su nombre. El nombre de las unidades fuente está formado por un código compuesto de dos letras que definen su zona de subducción (por ej. “ac” se refiere a la zona de subducción Auletian-Cascadia), de una letra que indica su posición en tierra o mar adentro, y de un número que indica su posición en la falla. El plano de falla “ki1a” es el primer plano de falla a lo largo de la zona de subducción Kamchatka-Yap.

### Parámetros del modelo de ejecución (Model Run parameters)

Los parámetros del modelo del MOST se establecen manualmente en el cuadro situado en la parte de arriba a la derecha de la pestaña *Model Setup*. La siguiente información es una breve descripción de los parámetros del modelo. Encontrará información más detallada en el manual del MOST.

Model Parameters	
0.0001	Minimum amp. of input offshore wave (m)
5.0	Minimum depth of offshore (m)
0.1	Dry land depth of inundation (m)
0.0009	Friction coefficient ( $n^2$ )
<input checked="" type="checkbox"/>	Let A-Grid and B-Grid run up
300.0	Max eta before blow-up (m)
2.1500	Time step (sec)
20093	Total number of time steps in run
3	Time steps between A-Grid computations
1	Time steps between B-Grid computations
15	Time steps between output steps
0	Time steps before saving first output step
1	Save output every n-th grid point

**Amplitud mínima de datos de entrada de onda mar adentro (m) (Minimum amplitude of input offshore wave)** – Se omiten los valores más pequeños relativos a la amplitud. Sólo cuando las amplitudes absolutas exceden este límite, se empieza a introducir información mediante la malla externa (*A-grid*). Por lo general, se trata de un número pequeño por encima del cero de la máquina (0,001 es un valor típico)

**Profundidad mínima mar adentro (m) (Minimum depth of offshore)** – Especifica la profundidad para las mallas A y B (*A-grid* y *B-grid*) en la que se desarrollan las condiciones de límite de reflexión. Valores típicos 5 – 10 m.

**Profundidad de inundación en tierra firme (m) (Dry land depth of inundation)** – Especifica la profundidad mínima de la columna de agua sobre la que el modelo realiza los cálculos matemáticos. Si el nivel de agua es inferior a este valor, se considera que la célula está seca y no se realiza ningún cálculo. Esto establece un umbral de condiciones de límite variables. Los valores típicos son 0,1-0,3 m.

**Coefficiente de rugosidad ( $n^2$ ) (Friction coefficient)** – Especifica el coeficiente de rugosidad de Manning ( $n^2$ ).

**Permitir runup en las mallas A y B (Let A-grid and B-grid runup)** – Si la casilla está marcada, el cálculo del runup se realiza para las mallas A y B (con el parámetro tierra firme (*dry land*) especificado en *Minimum depth of offshore*). De lo contrario, se establece el límite de reflexión fijo a la misma profundidad. El parámetro por defecto es marcar la casilla.

**Tiempo máximo estimado de arribo antes del impacto (m) (Max eta before blow-up)** – El cálculo finaliza cuando la amplitud calculada excede este valor: Se recomienda 30-100 m.

**Intervalo de tiempo (segundos) Time step**– Muestra el tiempo de cálculo de la malla C (C-grid). La malla C se calcula para cada tiempo.

**Número total de intervalos de tiempo en ejecución (Total number of time steps in run)**  
Número de intervalos de tiempo.

**Intervalo de tiempo entre los cálculos de la malla A (Time steps between A- grid computations)** – Las dinámicas de la onda de la malla A se pueden calcular con menos frecuencia que las de la malla C. La malla A tiene una resolución inferior a la C, por lo que la condición CFL exige menos recursos y puede usar un mayor intervalo de tiempo para producir cálculos estables. El número de pasos omitidos multiplicado por el intervalo de tiempo define el intervalo de tiempo efectivo para la malla A.

**Intervalo de tiempo entre los cálculos de la malla B (Time steps between B- grid computations)** – Se aplica lo anteriormente explicado para la malla A.

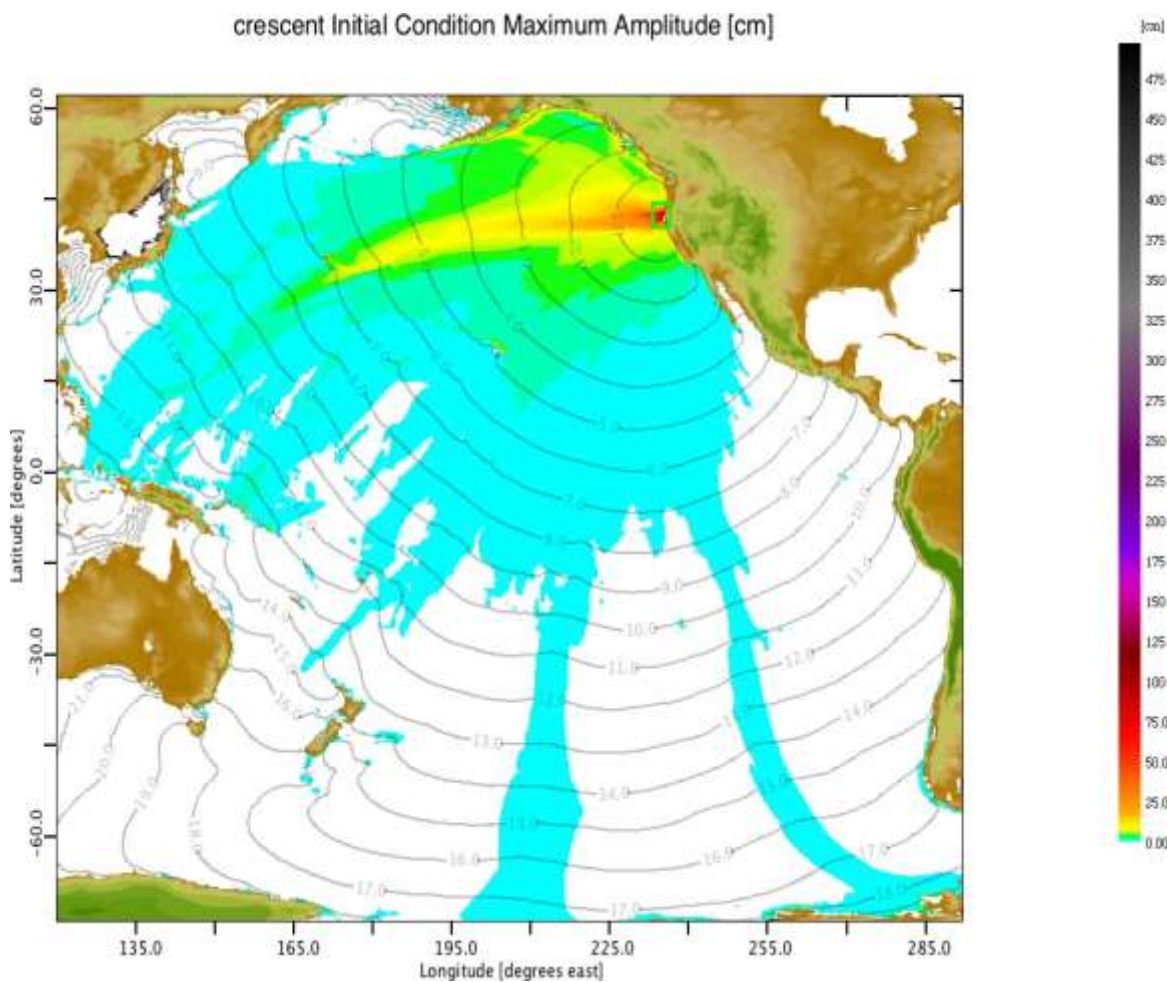
**Intervalo de tiempo entre productos (Time steps between output steps)** – Precisa la frecuencia de amplitud y velocidad que se guarda en un campo.

**Intervalo de tiempo antes de guardar el primer producto (Time steps before saving first output step)** – Permite guardar el producto de un intervalo de tiempo específico para evitar guardar intervalos de tiempo con amplitud cero.

**Guardar el resultado cada enésimo punto de malla (Save output every n-th grid point)** – Muestra el tamaño de los archivos guardados por submuestreo de los campos de salida. El parámetro es el mismo para todas las mallas.

### Pestaña: *Initial Condition* (Condición inicial)

Una vez que el *Model Run* se ha cargado y las unidades fuente (*Unit Sources*) han sido seleccionadas para forzar el modelo, el usuario puede iniciar la ejecución haciendo clic sobre *Start model* (Iniciar modelo). Las unidades fuente seleccionadas se descargan desde el servidor ComMIT y se combinan según los coeficientes Alfa seleccionados en el cuadro *Unit Source*. Esta combinación de fuentes se muestra en la pestaña *Initial Condition* en la que se puede observar la amplitud de onda máxima y el tiempo de llegada (en horas) para la fuente seleccionada: El color representa la amplitud de onda máxima en relación al tiempo y muestra cómo la energía del tsunami tiende a alejarse de la zona de subducción en forma de “dedos” y “lóbulos” extendiéndose de forma perpendicular a la costa.



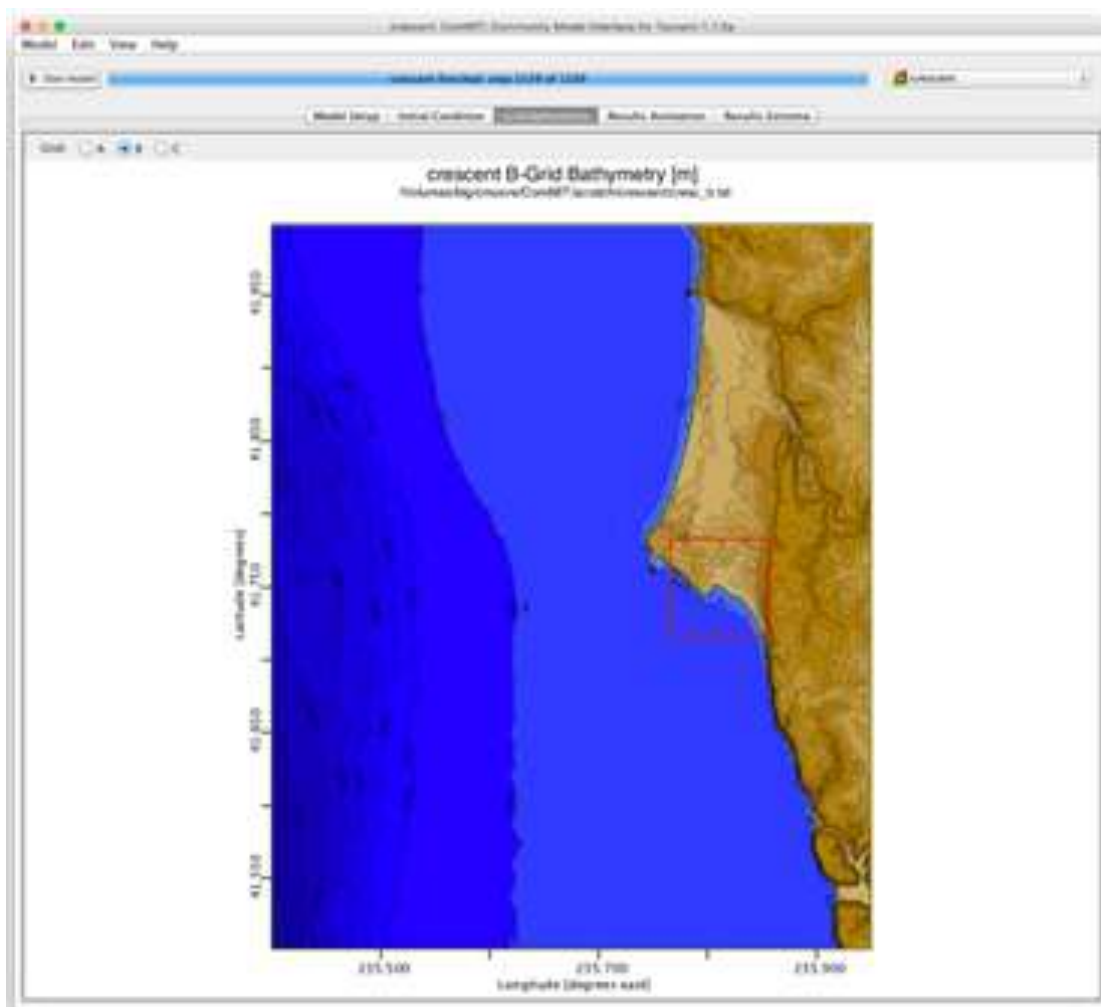
**Pestaña: *Grid Bathymetry* (Batimetría de la malla)**

Muestra una representación gráfica en color de la batimetría de la zona y un esquema de las mallas telescópicas con el mismo código de color que las mallas: verde para la malla A (*A-grid*), amarillo para la cuadrícula B (*B-grid*) y rojo, para la C (*C-grid*):

El nombre del archivo de la malla batimétrica se visualiza justo debajo del título de la malla.


Se muestra este archivo al abrir la carpeta *Model Run* (desde la pestaña *Model Setup*). El usuario puede acercar o alejar la imagen y seleccionar una de las tres mallas con los botones

*Grid*:

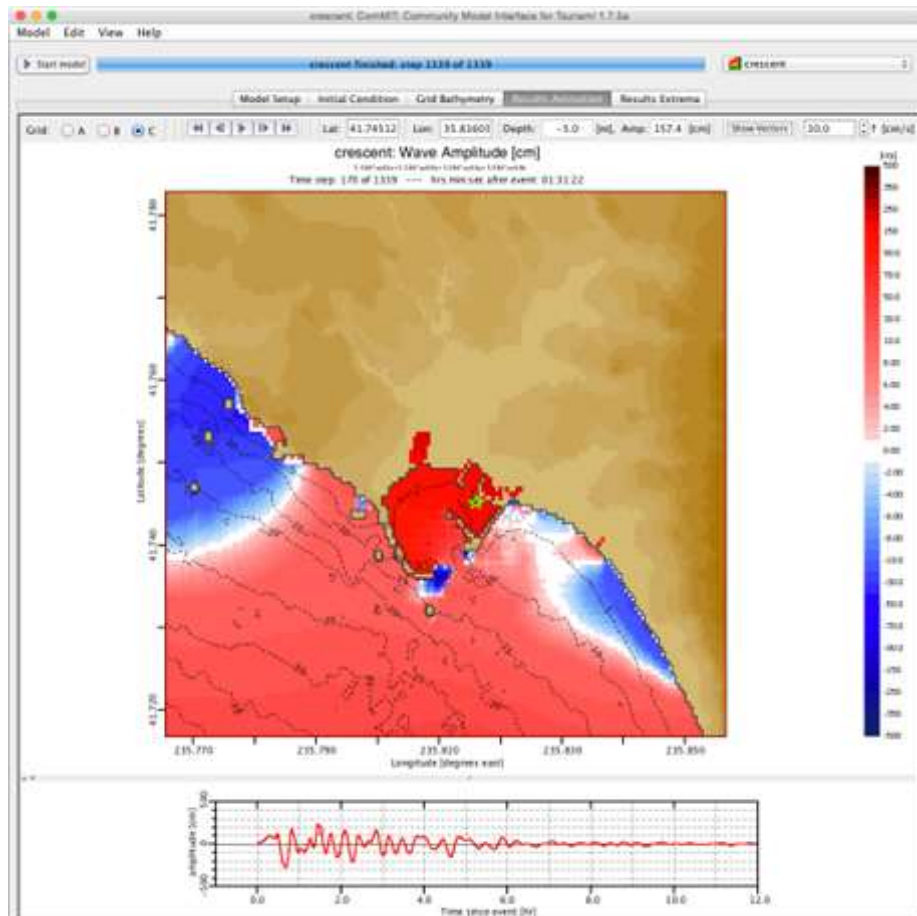


### **Pestaña: *Results Animation* (Animación de resultados)**

Muestra los resultados totalmente dependientes del tiempo para el modelo de salida incluyendo la amplitud de onda, la velocidad y la serie de tiempos (Figura 4). Para ver los resultados de cualquiera de las mallas, seleccione con la malla el selector *Grid: A-B-C* situado en la parte izquierda. El panel principal muestra una representación gráfica en color de la amplitud de onda (*Wave amplitude*) sobre los contornos discontinuos de la batimetría y topografía del fondo del mar en sombras de color marrón claro y oscuro.

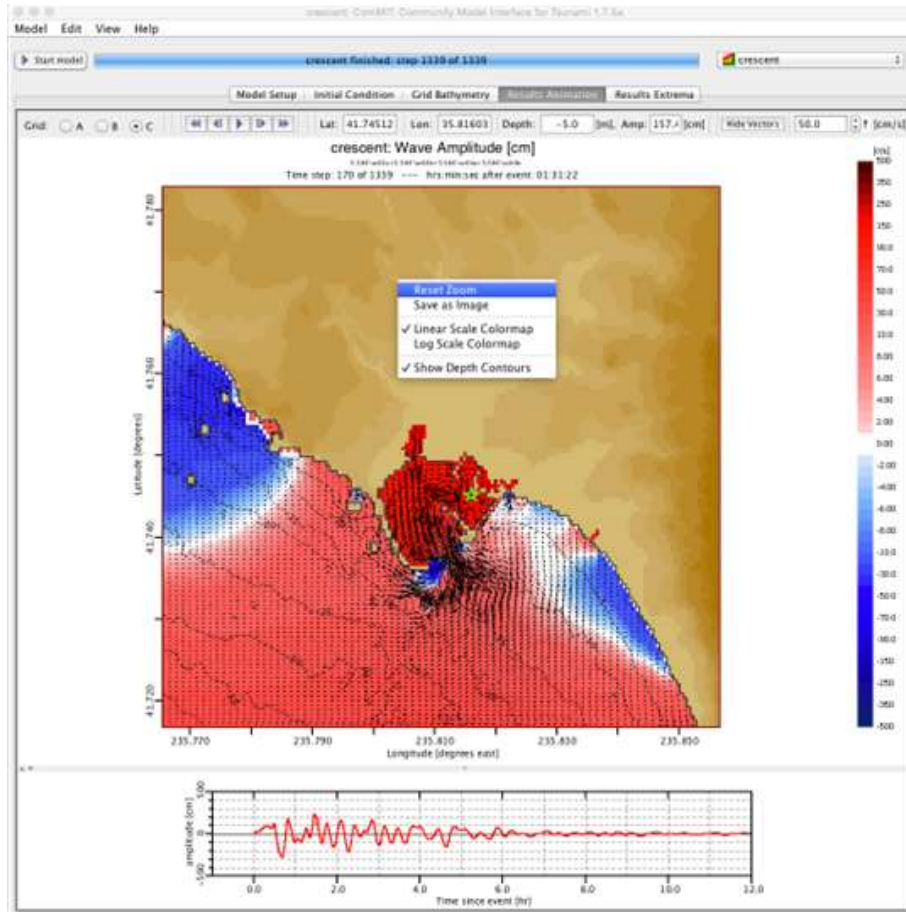
La pestaña se divide horizontalmente. La ventana inferior muestra una serie de tiempos. La estrella verde que se ve en el gráfico de la amplitud de onda (la *Wave Amplitude*) situado en la parte superior muestra la ubicación de la serie de tiempos. El usuario puede cambiar esta ubicación haciendo doble clic sobre el gráfico de la amplitud de onda (*Wave Amplitude*). La latitud y longitud de la ubicación de la serie de tiempos señalada por la estrella se muestra en la parte superior. Otra forma de cambiar de sitio la ubicación de la serie de tiempos es corrigiendo estos valores. Se pueden animar los resultados usando las flechas . La flecha situada en el centro es *Play*, las que se encuentran justo a su izquierda y derecha sirven para avanzar o retroceder una vez, respectivamente. Para ir al inicio, haga clic en la flecha doble de la izquierda, y para ir al final, haga clic en la flecha doble de la derecha. Para ir a un momento determinado de la animación, haga clic en ese momento determinado de la serie de tiempos del gráfico.





La profundidad y la amplitud de onda en la ubicación de la serie de tiempos se muestran en la parte superior y sirve para determinar la amplitud de onda en un lugar y en un intervalo de tiempo determinado.

Para ver los vectores de velocidad, haga clic en el botón *Show Vectors* (Mostrar vectores). La longitud del vector es proporcional a la velocidad en la posición del vector, y la escala se muestra en la parte superior al lado del botón *Show Vectors*. Para poder observar mejor la velocidad de la corriente en el gráfico, la escala se puede reducir o ampliar. Al hacer clic sobre el botón de la animación, se animan los vectores junto con el campo de la amplitud de onda.

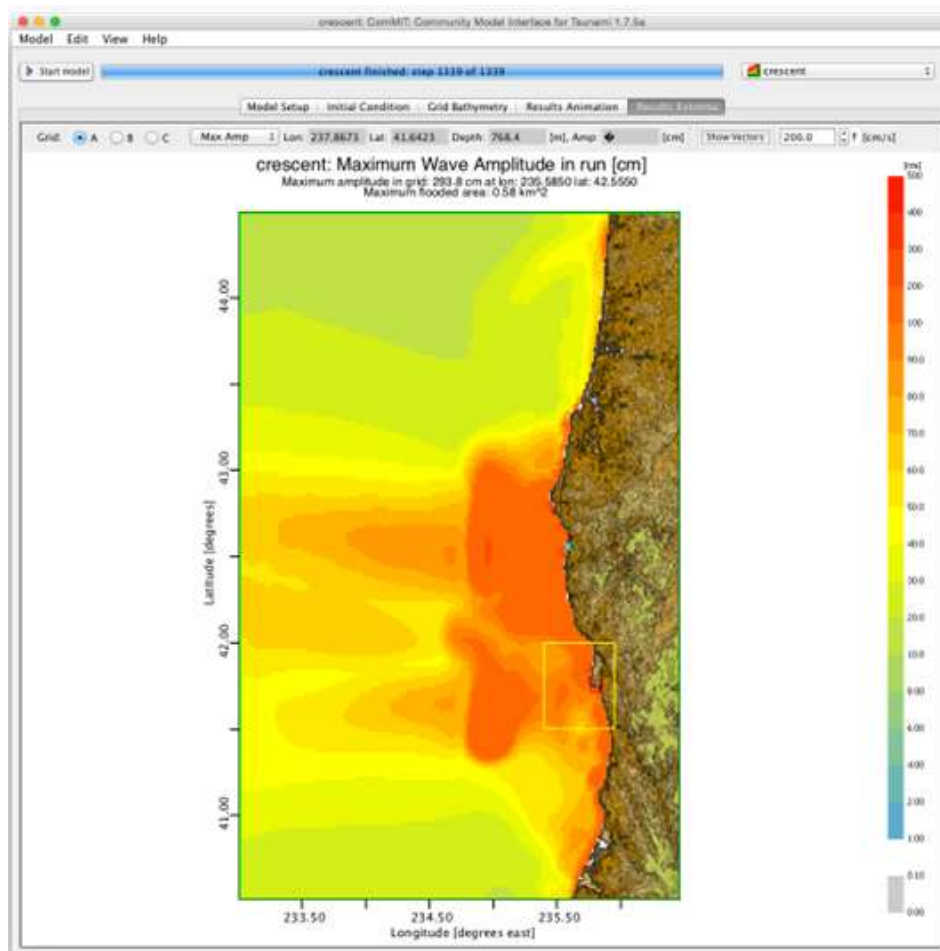


Para ampliar o reducir el gráfico de la amplitud de onda (*Wave amplitude*), haga clic y arrastre el gráfico hacia dentro o hacia fuera, y para restablecer el nivel de tamaño estándar, haga clic con el botón derecho del ratón en Reset Zoom.

Además, el usuario puede seleccionar un pseudo-registro para la escala de colores del mapa (útil para simulaciones de tsunamis con una amplitud de onda muy pequeña) y guardar el gráfico como imagen.

### Pestaña: *Results Extrema* (Resultados extremos)

Muestra los resultados del modelo con la máxima amplitud de onda (*Maximum Wave Amplitude*) en el tiempo, con la mínima amplitud de onda (*Minimum Wave Amplitude*), o con la máxima velocidad de onda (*Maximum Wave Speed*) (Figura 6). El usuario puede elegir el resultado que desea ver seleccionando “Max Amp”, “Min Amp” o “Max Speed”, respectivamente. Al desplazar el ratón por encima del gráfico, aparece en la parte superior la longitud (*Longitude*), latitud (*Latitude*), profundidad (*Depth*) y amplitud (*Amplitude*) y el botón *Show Vectors* muestra los vectores de velocidad tal y como aparecen en la pestaña *Results Animation* (sección precedente). Téngase en cuenta que los vectores de velocidad representan la velocidad de la corriente máxima y la dirección de la corriente en el momento en que se encuentra en su máximo.

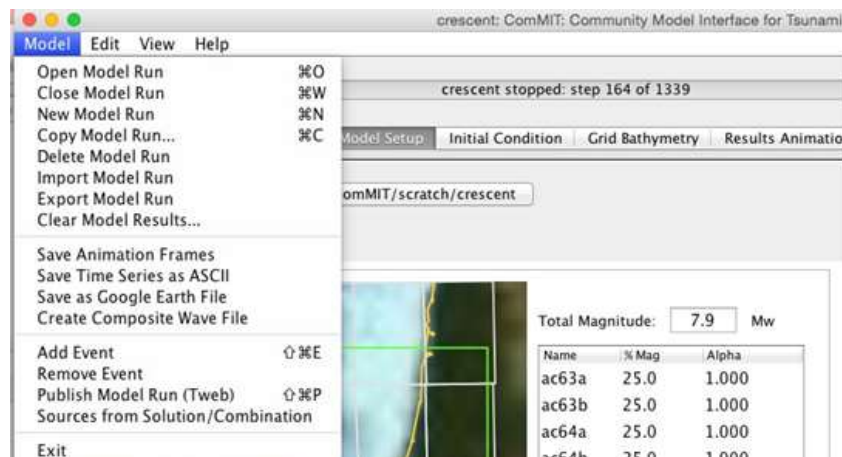


## Elementos del menú de ComMit

Actualmente, la versión de escritorio de ComMIT sólo puede ejecutar un modelo (*Model Run*) a la vez, así que por lo general el elemento del menú *Model* (modelo) se aplica al modelo (*Model Run*) cargado y que se muestra en el menú desplegable situado en la parte superior de ComMIT. Un modelo (*Model Run*) está formado por 3 mallas batimétricas (*A-grid*, *B-grid* y *C-grid*) y por el archivo que contiene los parámetros del modelo del MOST. Estos cuatro elementos se encuentran en una carpeta con el nombre del modelo (*Model Run*), así que un *Model Run* es una carpeta que se puede abrir haciendo clic en el botón *Model Run* situado en la pestaña *Model Setup*.

### Elemento del menú: *Model* (modelo)

Permite al usuario abrir (Open) y cerrar (Close) el *Model Run*. Los resultados se guardan incluso cuando el *Model Run* está cerrado. Los resultados se eliminan solamente cuando el usuario elige nuevas fuentes (*Sources*) o cuando elige la opción *Clear Model Results*.



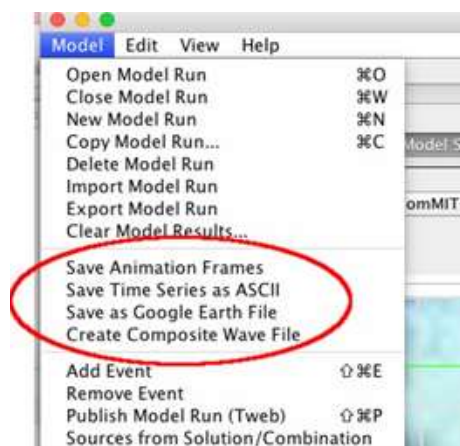
**Para crear un nuevo modelo para ejecutar (New Model Run),** seleccione esta opción en el menú desplegable. Un cuadro de diálogo ayuda al usuario a identificar las tres mallas batimétricas ya sea abriendo los archivos que el usuario ha proporcionado, ya sea solicitando los archivos al servidor ComMit.

**La opción Delete Model Run (Eliminar un modelo)** es la única función que elimina definitivamente los archivos batimétricos, por lo que el usuario debe ser prudente cuando use esta función. El programa mostrará un mensaje de aviso, pero se debe tener en cuenta que *¡los resultados de un modelo se crean fácilmente, mientras que los batimétricos no!* La opción **Delete Model Run** elimina toda la carpeta del **Model Run**: los resultados del modelo, los archivos de malla, y el archivo de parámetros del MOST.

**La opción Clear Model Results (Borrar los resultados del modelo)** sólo borra los resultados del modelo que, por supuesto, se pueden volver a crear simplemente relanzando el modelo haciendo clic en **Start model**.

**Las opciones Import Model Run (importar modelo) y Export Model Run (exportar modelo)** simplemente crean un archivo en formato zip de la carpeta Model Run que solamente contiene los archivos batimétricos y los archivos de los parámetros del modelo. De este modo, si el usuario desea obtener ayuda de la comunidad que elabora modelos numéricos de tsunamis puede adjuntar fácilmente el archivo a un correo electrónico.

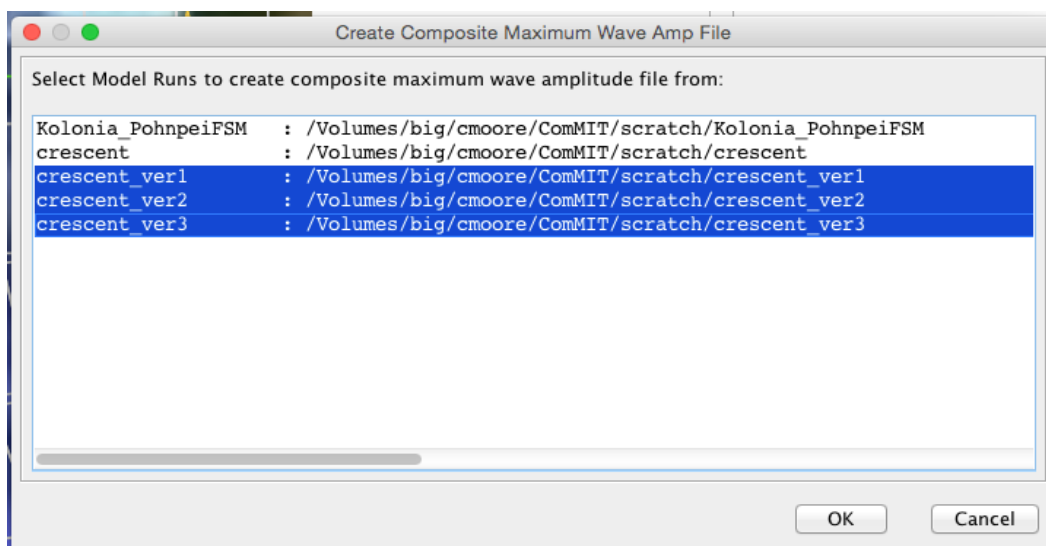
**Las opciones de salvar resultados (Save)** permiten guardar resultados bajo diferentes formatos de archivo.



**La opción *Animation Frames (Animación de fotogramas)*** guarda cada uno de los fotogramas obtenidos de los Resultados de la animación (*Results Animation*) como una secuencia de archivos de imagen numerados en formato PNG para poder crear una película (el usuario debe combinar estos archivos en una animación). La opción *Save Time Series as ASCII* (Guardar la serie de tiempos en formato ASCII) guarda en un archivo la serie de tiempos que se encuentra en la pestaña *Results Animation*. La opción *Save as Google Earth file* (Guardar como un archivo de Google Earth) simplemente guarda los resultados como un archivo de Google Earth con las opciones de guardar sólo máximos o una animación. Si se opta por modelizar un evento de tsunami específico, los tiempos en el archivo de Google Earth aparecerán en formato UTC (hora universal coordinada).

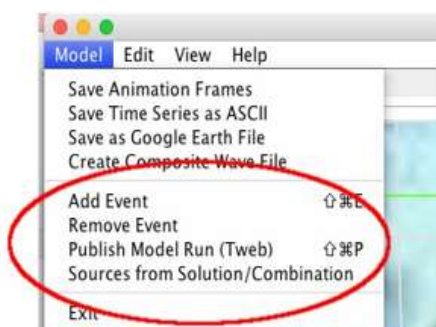
#### **Crear archivo compuesto de onda (Create Composite Wave File)**

Un uso habitual de ComMit es el de crear un mapa de evaluación de riesgos o de evacuación para una zona determinada. La técnica se enseña en los talleres de formación sobre ComMit e implica ejecutar la misma batrimetría del modelo (*Model Run*) usando diferentes combinaciones de unidades fuente (Unit Source). Si el usuario guarda todos los modelos (*Model Run*) para una evaluación de riesgos, esta opción del menú creará un archivo compuesto de máxima amplitud de onda. La carpeta ComMIT contiene una lista de modelos (*Model Runs*) para que el usuario seleccione cuáles deben ser incluidos en la composición (Figura 8). Todos los modelos (*Model Runs*) deben utilizar la misma batrimetría en la evaluación de riesgos, la opción *Copy Model Run* (Copiar el modelo) simplifica esta tarea.



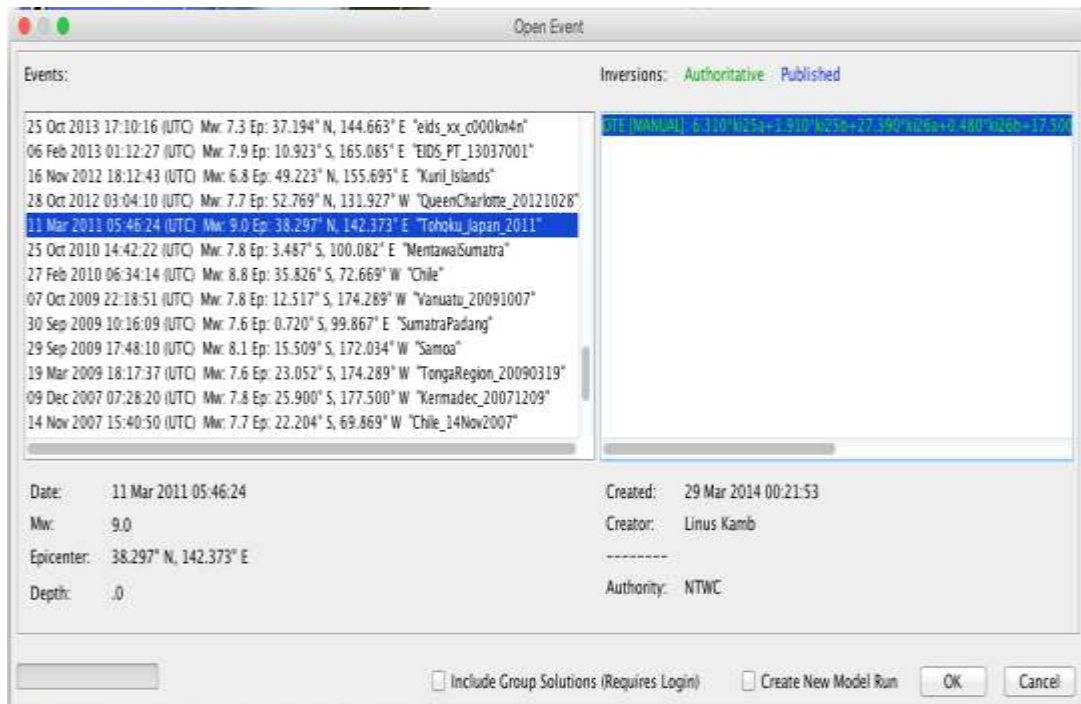
### ***Eventos de tsunami y Tweb***

El último conjunto de opciones del menú se encarga de encontrar las unidades fuente adecuadas para los eventos de tsunamis históricos. La opción *Add Event* (Añadir evento) abre un cuadro de diálogo que muestra información sobre el evento proveniente de los archivos de eventos reales de tsunamis. Los archivos sólo representan un subconjunto de todos los eventos de tsunami, sin embargo se muestra cada uno de los eventos para los que una solución de unidad de fuente ha sido obtenida a través del sistema de predicción de tsunamis de la NOAA. La información que se muestra incluye la fecha y la hora (en formato UTC), la magnitud de momento ( $M_w$ ), la ubicación del epicentro (grados de latitud y longitud) y un breve descriptor que identifica el evento.





El cuadro de diálogo permite al usuario elegir el evento de la lista de eventos y proporciona a ComMIT las unidades fuente “fidedignas” para el evento (Figura 9). Cuando sucede un nuevo evento, se actualiza esta solución fidedigna con nuevos datos procedentes de la red de boyas DART y se llevan a cabo nuevas inversiones.



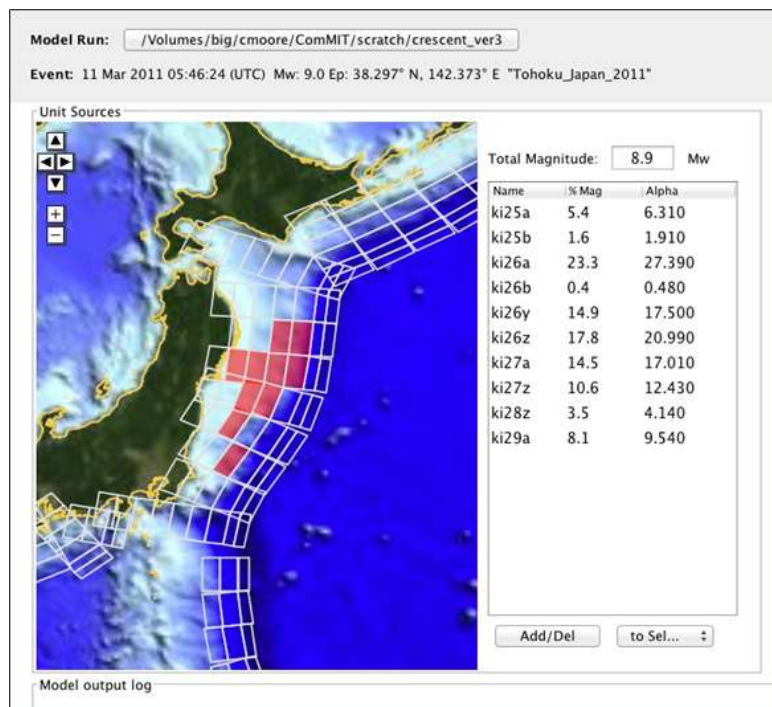
Cuando el usuario selecciona un evento dado, el modelo (*Model Run*) actualiza las unidades fuente (Unit Sources) seleccionadas en el mapa de la pestaña *Model Setup* y muestra la información del evento (Event: ...):

El otro cambio se muestra en la pestaña *Results Animation*, si hay un mareógrafo en la malla C (C-grid), éste se mostrará como un triángulo negro invertido (▼) y los datos del mareógrafo para el periodo de tiempo del evento se representarán gráficamente en la ventana de la serie de tiempos con los datos del mareógrafo en negro y el resultado del modelo en rojo (Para comparar los resultados del modelo con los del mareógrafo, haga doble

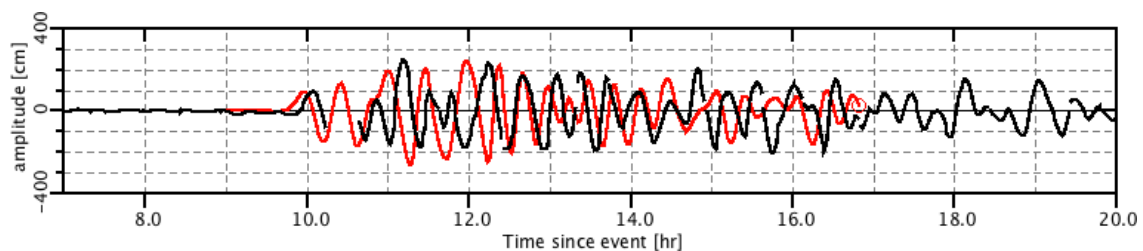


clic sobre el gráfico de la amplitud de onda para configurar la ubicación de la serie de tiempos (estrella verde) cerca del triángulo negro que representa la posición del mareógrafo. Hay que tener en cuenta que la ubicación de los mareógrafos que se muestra en el servicio web de observación del nivel del mar de la COI en el que se basa ComMIT a menudo presenta errores, ¡a veces de un kilómetro o más. Google Earth u otra fuente de fotografías aéreas permite al usuario identificar el muelle en el que se encuentra instalado el mareógrafo.

### ***Datos sobre el evento***



### ***Resultados del modelo vs el mareógrafo de referencia***



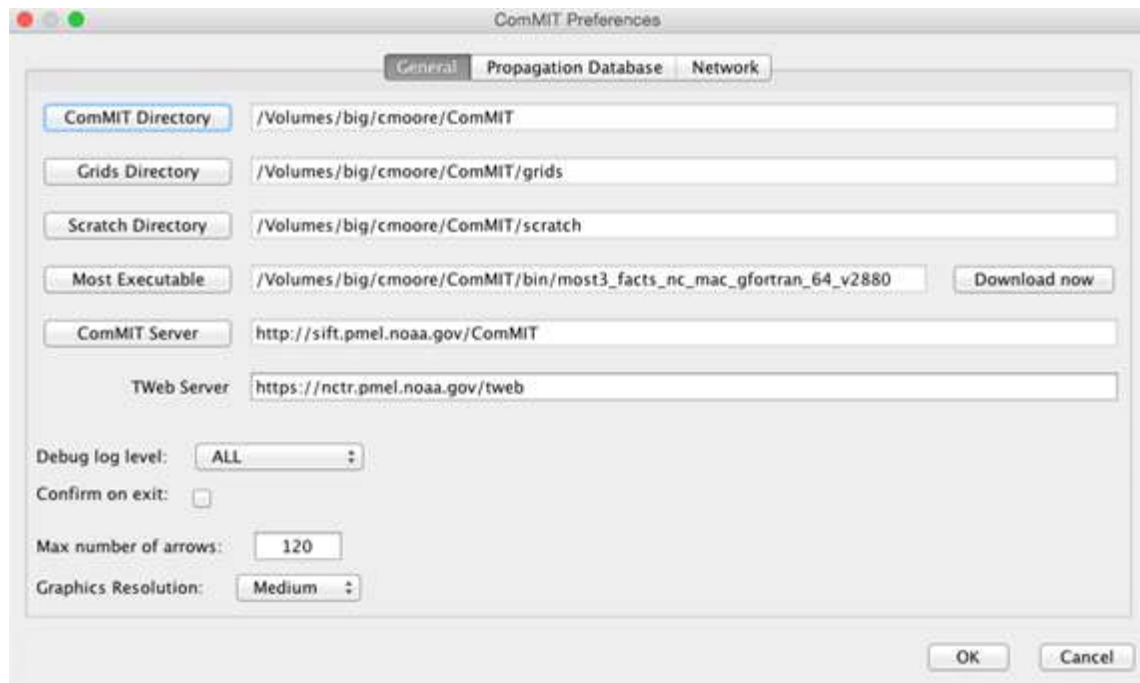
**Eliminar un evento de un modelo (Model Run)** simplemente eliminará los datos del mareógrafo y la etiqueta del evento de la pestaña *Model Setup*.

**Para los usuarios con cuentas Tweb que tengan rango de meteorólogo (forecaster), la opción Publish Model Run (Publicar modelo)** les permitirá subir los resultados del modelo para un evento dado a su cuenta Tweb, la interfaz en línea para el sistema operacional de predicción de tsunamis, SIFT (Predicción de inundación de tsunamis en corto plazo).

**La opción Sources from Solution/Combination (Fuentes de solución/combinación)** permite seleccionar las unidades fuente introduciendo de forma manual los nombres de las unidades fuente y los alfas. Esta opción resulta útil para conseguir una solución vía correo electrónico, o para copiar y pegar desde otra aplicación como Tweb.

#### **El elemento del menú: *Edit* (Revisar)**

Permite al usuario revisar las preferencias de ComMIT y los archivos batimétricos. Las preferencias de ComMIT consisten en configurar los directorios (carpetas) en los que se encuentran los archivos ComMIT, incluyendo la ubicación por defecto de los archivos de las mallas batimétricas (*Grids Directory*), el directorio de los *Model Runs* (*Scratch Directory*), el archivo ejecutable del modelo del MOST (normalmente descargado del servidor de ComMIT) y el servidor de ComMIT (Figura 11). El servidor de ComMIT proporciona las unidades fuente (*Unit Sources*) en ComMIT, sin embargo la pestaña *Propagation Database* (Base de datos de propagación) permite añadir un repositorio local de resultados del modelo de propagación para ser usados como fuentes. La pestaña *Network* (Red) permite administrar la información proxy en caso de que se esté ejecutando ComMIT desde un equipo con un cortafuegos o proxy activado.

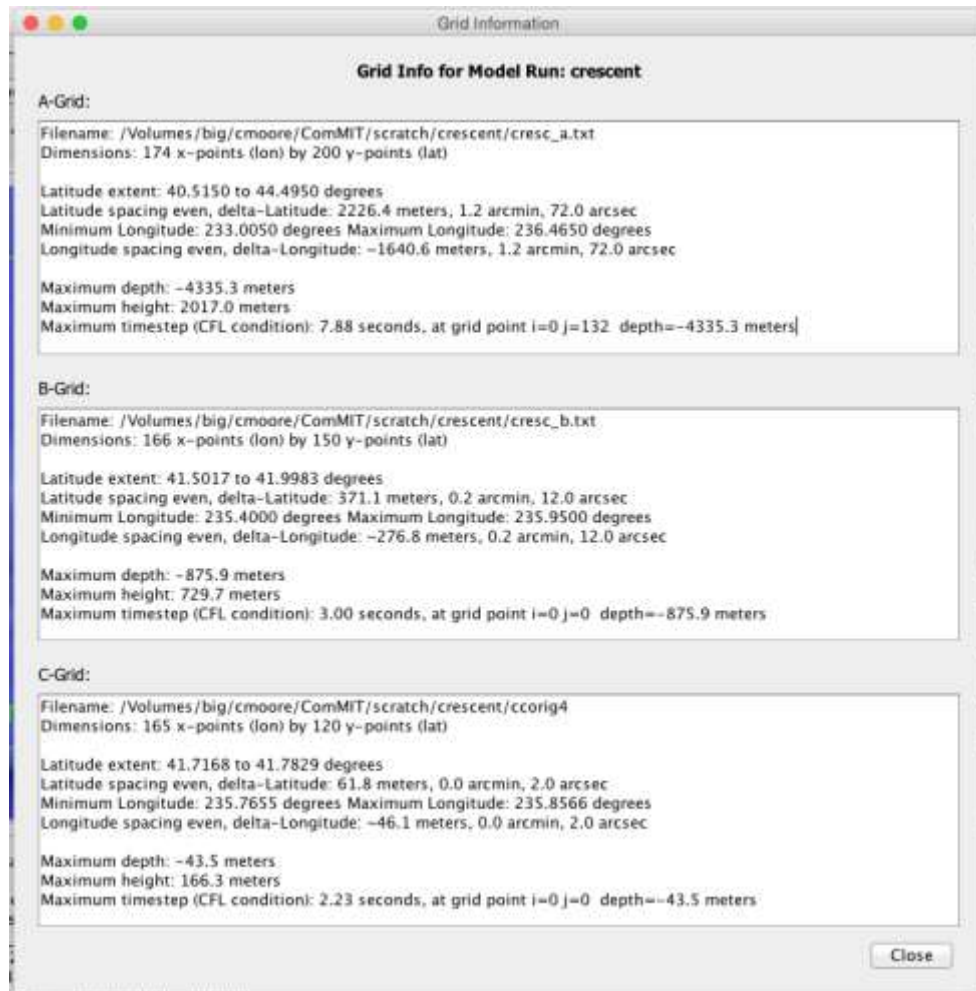


### **El elemento del menú: View (Ver)**

Muestra al usuario información sobre las mallas batrimétricas o el alcance de los archivos de propagación de la unidad fuente (*Unit Source*) (agrupado por cuenca oceánica: Pacífico, Índico y Atlántico).

### ***El elemento del menú View->Grid Information (CFL)*** (Ver->Información de la malla [CFL])

muestra un cuadro de diálogo con las estadísticas de cada una de las tres mallas batrimétricas para el modelo (*Model Run*) que está siendo ejecutado (Figura 12). La información está compuesta del nombre de archivo, las dimensiones, el alcance (en latitud y longitud), la resolución o “distancia”, la altura y profundidad máximas, y el criterio CFL para cada malla.



## Crear nuevos modelos (New Model Runs)

### Datos de batimetría mundial

Para crear un nuevo modelo (*Model Run*), vaya a *Model-> New Model Run*. Los usuarios pueden usar esta característica para cargar sus propias mallas batimétricas o para descargar mallas batimétricas desde el servidor de ComMIT. El servidor de ComMIT proporciona modelos digitales de elevaciones que combinan datos batimétricos/topográficos para la modelización de tsunamis. *Si bien el conjunto de datos resulta útil para fines de formación y demostración, éste ha sido generado de forma automática a partir de fuentes de datos batimétricas de baja resolución y ha sido objeto de una escasa revisión manual. Por lo que no debe utilizarse para elaborar cartografía de riesgos o fines similares.*

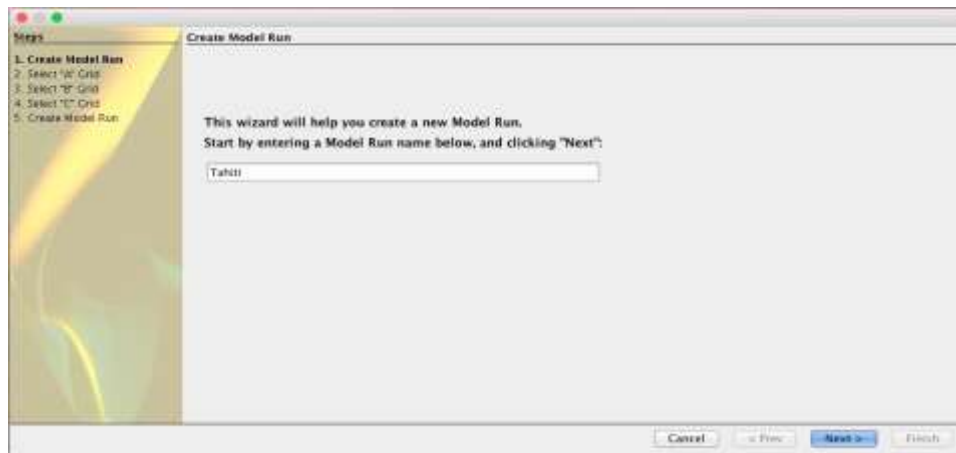
El conjunto de datos batimétricos que contiene el servidor de ComMIT proviene de dos fuentes: La batimetría proviene de [ETOPO1, modelo cuadriculado de relieve global de 1 minuto de arco](#) desarrollado por el Centro Nacional de Datos Geofísicos de la NOAA. El conjunto de datos de ETOPO1 ha sido compilado a partir de numerosos conjuntos de datos regionales y globales, evaluado, revisado y ajustado verticalmente al nivel medio del mar de referencia y horizontalmente al estándar WGS84. Estos datos han sido INTERPOLADOS DE 60 SEGUNDOS DE ARCO A 3 SEGUNDOS DE ARCO para adaptarlos al conjunto de datos topográficos. Por lo que estos datos sólo resultan apropiados con fines pedagógicos.

La topografía deriva del modelo digital de elevaciones [CGIAR SRTM 90m](#) (versión 4) desarrollado por el Consorcio para la Información Espacial del Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional. Este conjunto de datos de 3 segundos de arco (~ 90 metros en el Ecuador) es una versión procesada de los datos obtenidos por la Misión Topográfica de Radar volada en el Transbordador Espacial (SRTM por sus siglas en inglés) desarrollada por la NASA.

Después de haber configurado los valores del suelo de Etopo1 en -1,5 metros, los datos de Etopo1 son interpolados de 60 segundos de arco a 3 segundos de arco de la malla de SRTM. Luego, los valores del suelo son substituidos por los datos de SRTM. Esta interpolación genera un conjunto de datos batimétricos relativamente inexactos pero que tiende a ser estable para la mayoría de las fuentes que usan la base de datos de propagación del NCTR y, por lo tanto, resulta útil con fines pedagógicos. El NCTR recomienda su uso *sólo* para este fin.

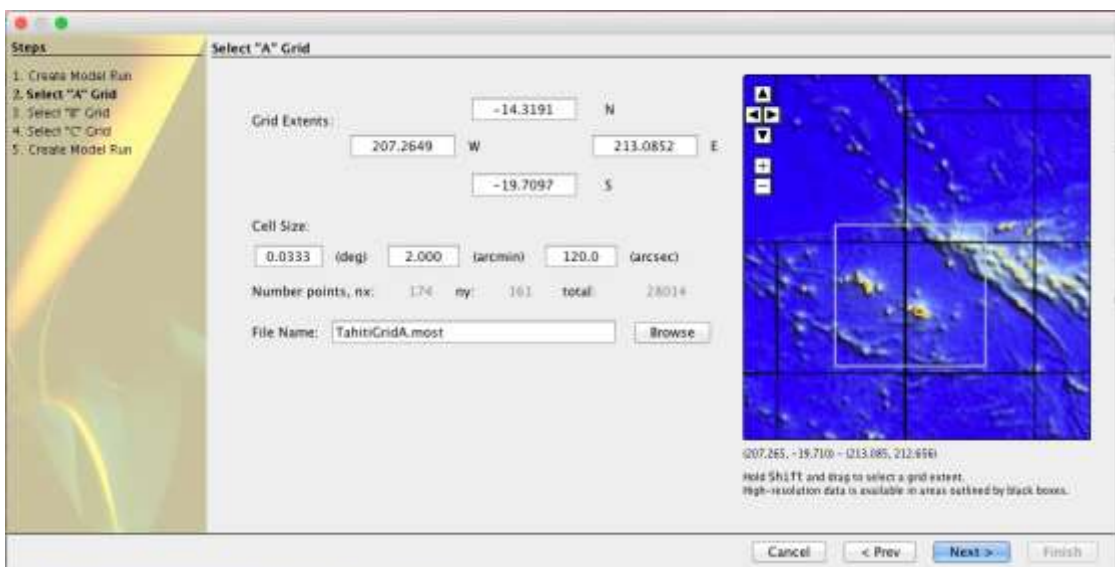
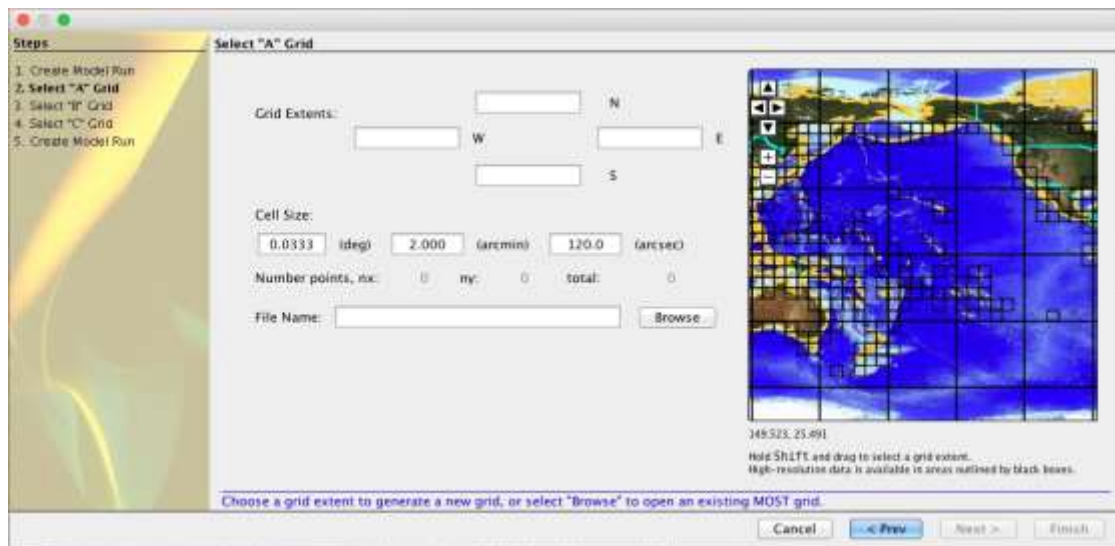
### Asistente para la creación de un nuevo modelo (*New Model Run Wizard*)

Para usar estos datos, haga clic en *Model-> New Model Run*. Esta acción abre un asistente (*Wizard*) que ayuda al usuario a seleccionar (o solicitar) mallas batimétricas, y crea un archivo de parámetros del modelo (*Model Parameters*) por defecto. El asistente acompaña al usuario a través de una serie de pasos. En el primero de ellos, el asistente pide simplemente al usuario que dé un nombre al modelo (*Model Run*) y haga clic en *Next*:



De los pasos 2 al 4, el usuario selecciona las tres mallas batimétricas. El usuario puede buscar un archivo de malla haciendo clic en el botón *Browse*, o ampliar una región del mapa y seleccionar una zona manteniendo pulsada la tecla Shift y arrastrando el ratón:

Una vez que se ha seleccionado una región manteniendo presionada la tecla Shift y arrastrando el ratón, se muestra la extensión de la malla (*Grid Extents*) y se traza un rectángulo gris de la región. Para la malla A (*A-grid*), la región debe ser al menos tan grande como los rectángulos negros de 5 grados por 5 grados que se muestran en el gráfico. El tamaño de la célula por defecto es de 120 segundos de arco. En este caso, las dimensiones de la malla A (*A-grid*) deben ser de 174 por 161. Existe un límite de tamaño para la malla solicitado por el servidor de ComMIT establecido en 160.000 puntos (p. ej. 400 por 400). El asistente no permite solicitar archivos de un tamaño mayor al especificado.



Una vez seleccionada la región, el usuario hace clic en *Next* (siguiente) y selecciona las mallas B y C (*B-grid* and *C-grid*) de la misma manera. La resolución del fondo del mapa es bastante pobre, a veces ayuda tener abierto un mapa de referencia como Google Earth para localizar el área de interés de la malla C (*C-grid*). Resulta útil delimitar una región para luego editar la extensión de la malla (*Grid Extents*) de forma manual para obtener exactamente la extensión deseada:



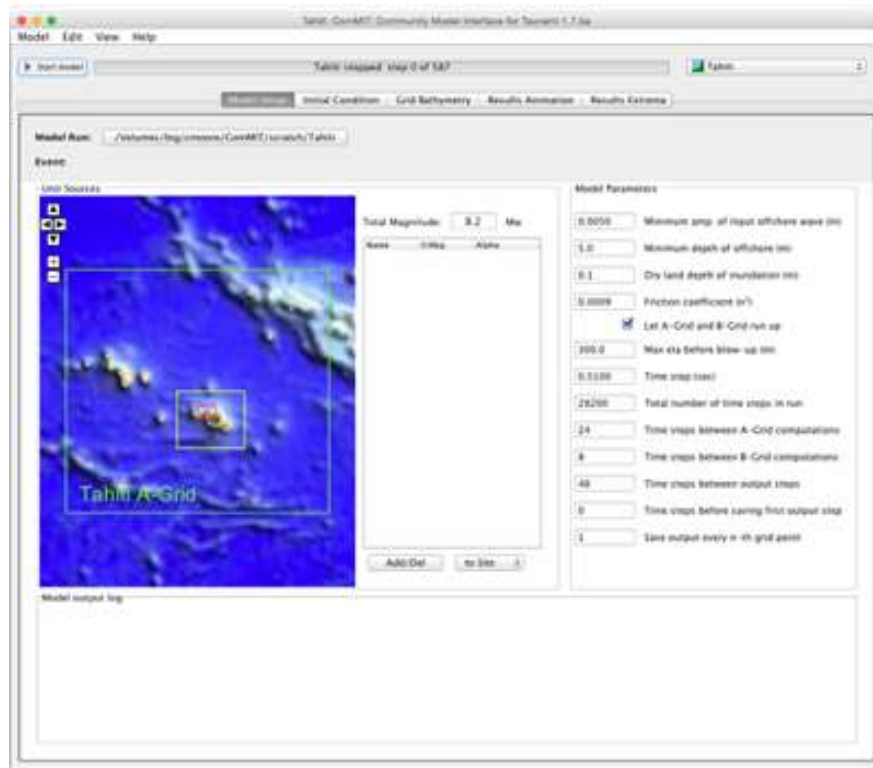


Medida exacta ajustada manualmente para disminuir el número total de puntos:

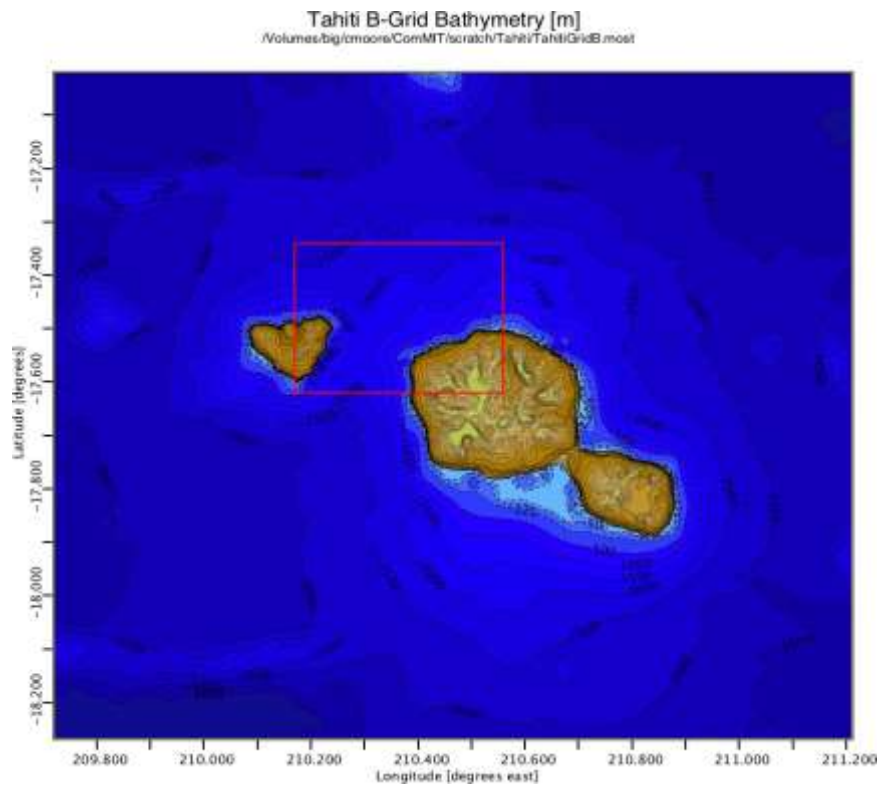


En el último paso, el usuario tiene que hacer clic en *Finish* (Terminar) para enviar la solicitud al servidor de ComMIT. La solicitud de las mallas batimétricas puede tardar un poco: ComMIT muestra una barra de progreso en la parte inferior izquierda del asistente mientras se descargan las mallas. Una vez finalizado el proceso, el usuario debe hacer clic en *Close* (Cerrar) para cerrar el asistente. El nuevo modelo (*Model Run*) está cargado.

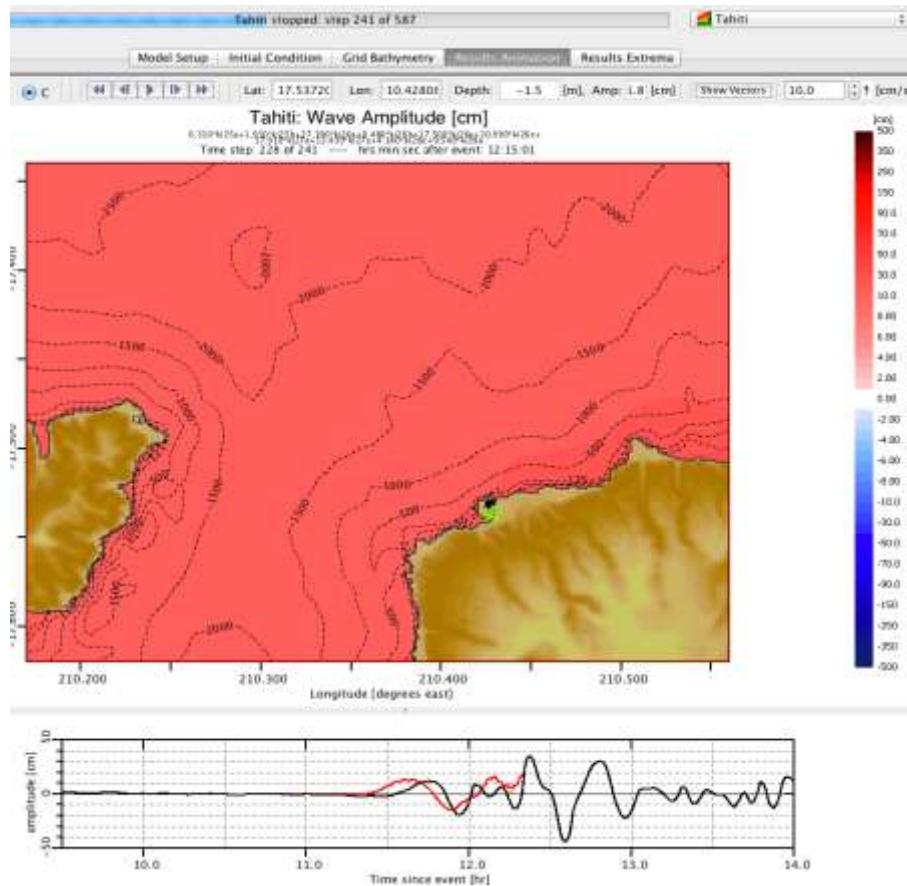




El usuario puede ver los archivos de malla en la pestaña *Grid Bathymetry*.



Y lanzar el modelo para ver los resultados de la inundación:



Téngase en cuenta que las mallas batimétricas del servidor de ComMit están guardadas en la carpeta *ComMIT/grids* y que después se copian en la carpeta *Model Run*. Si se usa una malla proporcionada por un usuario (haciendo clic en el botón *Browse* del asistente), ésta también se copia en la carpeta *Model Run* de forma a preservar el archivo original. Recortar y alisar la batimetría sólo afecta a la versión que se encuentra en la carpeta *Model Run*, no al archivo original.

#### Más información

Para obtener más información acerca de ComMIT, de la predicción de tsunamis y de la evaluación de peligro, diríjase al Centro para la Investigación de Tsunamis de la NOAA.

<http://nctr.pmel.noaa.gov>