

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Desarrollo de simulador numérico de inundación causada por
tsunami de origen tectónico en la costa sur de Guatemala

Trabajo de graduación presentado por
Claudia Sophia Méndez Belloso
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en
Ciencia de la Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala
2017

Desarrollo de simulador numérico de inundación causada por
tsunami de origen tectónico en la costa sur de Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Desarrollo de simulador numérico de inundación causada por
tsunami de origen tectónico en la costa sur de Guatemala


Trabajo de graduación presentado por
Claudia Sophia Méndez Belloso
para optar al grado académico de Licenciada en Ingeniería en
Ciencia de la Computación y Tecnologías de la Información

Guatemala
2017

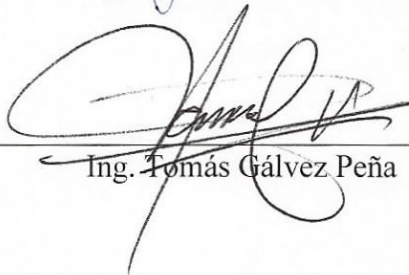
Vo.Bo.

(f) 
Ing. Lynette García Pérez

Tribunal

(f) 
MSc. Douglas Leonel Barrios

(f) 
Ing. Lynette García Pérez

(f) 
Ing. Tomás Gálvez Peña

Fecha de Aprobación: Guatemala, 17 de Mayo de 2017

PREFACIO

A Dios, por acompañarme y sostenerme desde el primer día.

A mi familia, por su amor incondicional desde siempre.

A mis amigos, por apoyarme cuando más lo he necesitado.

A mi asesora, Lynette García, por su paciencia y apoyo a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Puedo decir con total seguridad que los resultados que más valoramos son aquellos por los que hemos pagado un precio alto: sacrificio, esfuerzo, lágrimas y perseverancia. Cuando decidimos aceptar un reto, sabemos que este nos llevará fuera de nuestra zona de confort y nos obligará a realizar un esfuerzo más grande del que estamos acostumbrados. Muchas veces somos retados a hacer algo diferente para demostrar de lo que somos capaces en realidad. Para mi persona, estos cinco años han sido un reto, y más aún, esta fase de mi trabajo de graduación. Pero con cada intento, cada logro y cada tropiezo he logrado demostrarme a mí misma de lo que soy capaz, he aprendido a ser humilde y aceptar la ayuda de otros, también he aprendido a valorar esa ayuda y las oportunidades que se me han dado. Estoy satisfecha con la decisión que tomé al elegir estudiar Ciencias de la Computación ya que a partir de aquí puedo explorar diferentes campos y aplicar mi carrera a ellos. A cualquiera que lea esto, lo motivo a que luche por sus sueños, a que continúe aunque ya no tenga fuerzas y que no se detenga, porque si soñamos en grande podemos llegar a ser grandes.

ÍNDICE

	Página
PREFACIO	v
LISTA DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
A. OBJETIVO GENERAL.....	2
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. MARCO TEÓRICO.....	4
A. TSUNAMIS	4
B. PROYECTOS DESARROLLADOS	19
C. HERRAMIENTAS DE SOFTWARE.....	35
D. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	42
V. METODOLOGÍA.....	52
A. RECOPIACIÓN DE MARCO TEÓRICO	52
B. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL OBJETO DE ESTUDIO	52
C. SELECCIÓN DEL MODELO A EMPLEAR	52
D. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA A EMPLEAR EN EL SIMULADOR.....	53
E. DESARROLLO DEL SIMULADOR.....	53
F. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	53
G. DESARROLLO DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	53
VI. RESULTADOS.....	54
VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	62

VIII. CONCLUSIONES.....	65
IX. RECOMENDACIONES	66
X. BIBLIOGRAFÍA.....	67
XI. GLOSARIO	70

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
Tabla 1 Velocidad de propagación de tsunamis en función de la profundidad	9
Tabla 2 Principales características entre una ola de tsunami y una ola común	11
Tabla 3 Escala Sieberg de intensidades de tsunamis	12
Tabla 4 Escala de intensidad de tsunami según Imamura	13
Tabla 5 Escala de intensidad de tsunami según Lida	13
Tabla 6 Escala de grados de tsunami según Imamura, Lida y transcrita por Wiegel	14

LISTA DE FIGURAS

Ilustración	Página
Figura 1 Ocurrencia de tsunamis históricos en función de las diferentes fuentes que los generan	4
Figura 2 Dependencia entre la intensidad de un tsunami con la magnitud de un terremoto, para la magnitud de ondas superficiales M_s y para magnitud de momento M_m	5
Figura 3 Parámetros físicos y geométricos de la onda de tsunami	10
Figura 4 Registro mareográfico que permite advertir la presencia de un tsunami	11
Figura 5 Distribución de terremotos de $M_s > 7.0$ o mayores a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica.....	18
Figura 6 Frecuencia de terremotos de $M_s > 7.0$ o mayores a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica	18
Figura 7 Diagrama esquematizando el proceso de Modelado Matemático y Simulación Numérica	20
Figura 8 Esquema de una herramienta de predicción y toma de decisiones.....	20
Figura 9 Ubicación del Cinturón de Fuego del Pacífico.....	24
Figura 10 Parámetros de una falla.....	25
Figura 11 Configuración tectónica de Centro América.....	42
Figura 12 Configuración tectónica para Guatemala.....	43
Figura 13 Mapa de pendientes de Guatemala.....	44
Figura 14 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de San Marcos	46
Figura 15 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Retalhuleu	46
Figura 16 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Suchitepéquez	47
Figura 17 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Escuintla	47
Figura 18 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Santa Rosa	48
Figura 19 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Jutiapa	48
Figura 20 Mapa topográfico de Guatemala	49
Figura 21 Mapa topográfico de la Costa Sur de Guatemala.....	49
Figura 22 Mapa de curvas de nivel para Mesoamérica	50
Figura 23 Perfil batimétrico de la costa sur de Guatemala	50
Figura 24 Fenómeno de refracción de ola	51
Figura 25 Vista del área inundada por el tsunami de 1902, $M=0$, dirección: NE.....	54
Figura 26 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1902, $M=0$, dirección: NE.....	54
Figura 27 Vista de propagación del tsunami de 1902, $M= 2$, dirección: NO.	55

Figura 28 Vista de área inundada por el tsunami de 1902, M=2, dirección: NO.	55
Figura 29 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1902, M=2, dirección: NO.	55
Figura 30 Vista del área inundada por el tsunami de 1902, M=0, dirección: NO.	56
Figura 31 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1902, M=0, dirección: NO.	56
Figura 32 Vista del área inundada por el tsunami de 1950, M=0, dirección: E.	57
Figura 33 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1950, M=0, dirección: E.	57
Figura 34 Epicentro del tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.	57
Figura 35 Vista de propagación del tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.	58
Figura 36 Vista del área inundada por el tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.	58
Figura 37 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.	58
Figura 38 Vista del área inundada por el tsunami de 1915, M=0, dirección: N.	59
Figura 39 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1915, M=0, dirección: N.	59
Figura 40 Vista de propagación del tsunami de 1859, M=1, dirección: NE.	60
Figura 41 Vista del área inundada por el tsunami de 1859, M=1, dirección: NE.	60
Figura 42 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1859, M=1, dirección: NE.	60
Figura 43 Vista de propagación del tsunami de 1916, M=0, dirección: NE.	61
Figura 44 Vista del área inundada por el tsunami de 1916, M=0, dirección: NE.	61
Figura 45 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1916, M=0, dirección: NE.	61

RESUMEN

El presente trabajo de graduación representa la investigación realizada sobre las características de los tsunamis, con enfoque en aquellos de origen tectónico, sus mecanismos generadores y el impacto que estos han tenido a lo largo de la historia. A partir de tsunamis históricos, han surgido diversos sistemas matemáticos y físicos que los modelan, tomando en cuenta las variables que influyen en su generación y propagación. Con estos modelos se han desarrollado múltiples proyectos en diferentes países que buscan recrear tsunamis a través de simulaciones que implementan dichos modelos numéricos.

Lo que se pretende con este trabajo es recrear la simulación numérica de la generación y propagación de un tsunami de origen tectónico, implementada en un algoritmo que permita determinar un área inundada a causa de un tsunami. Aquí se presentan los procedimientos realizados para el desarrollo de un simulador numérico de inundación de tsunamis. Este surgió a partir de la problemática que tiene Guatemala al no contar con un sistema de alerta temprana de tsunamis. Esta versión inicial del simulador tiene el propósito de estimar aquellas áreas territoriales de la costa sur de Guatemala que resultarían inundadas debido a un tsunami de origen tectónico que ocurriera en el Océano Pacífico cerca de dichas costas.

El resultado que se espera de este trabajo es la estimación aproximada del área territorial de la zona de estudio que resultaría afectada por la inundación de un tsunami. Además, se espera obtener el software del simulador en una versión inicial, incluyendo el código fuente y las herramientas de software (gratuitas y de código abierto) que se emplearon para su diseño y desarrollo.

I. INTRODUCCIÓN

El Océano Pacífico tiene el más alto riesgo de presencia de terremotos y tsunamis por encontrarse dentro del “Cinturón de Fuego del Pacífico”. Por lo tanto, está estructural, topográfica y sísmicamente acondicionado para servir de campo adecuado para la liberación de las tensiones tectónicas, siendo así, el sistema generados de tsunamis más activo del planeta. La costa de Guatemala a Nicaragua tiene un 32% de probabilidad de que se generen tsunamis luego de un evento sísmico fuerte, mientras que la costa de Costa Rica a Panamá tiene un 67% de probabilidad.

La necesidad de la elaboración de mapas de zonas de riesgo surge a partir del hecho que en el país no existe información genera y publica acerca de las zonas en riesgo de inundación por tsunami en la costa sur del país; por lo que, la población no tiene conocimiento del riesgo que está corriendo, lo que puede repercutir en grandes pérdidas económicas, materiales y de humanas. De lo anterior puede hacerse la siguiente pregunta: ¿Qué efecto sobre la población, la economía, y la geomorfología del lugar tendría un tsunami en la costa sur de Guatemala?

El presente informe fue estructurado en Justificación, Marco Teórico, Metodología, Resultados y Discusión de Resultados. En la Justificación se describe la situación problemática y se fundamenta la necesidad del estudio. En el Marco Teórico se describen las características físicas y los mecanismos generadores de un tsunami. Así como la probabilidad de que zona de estudio se vea afectada por un fenómeno de este tipo. Se hizo una revisión bibliográfica de los proyectos que se han desarrollado en otros países sobre el tema. Se realizó un estudio sobre algunas de las herramientas de software más conocidas para el desarrollo de aplicaciones con un enfoque similar al de este trabajo de graduación. Así también, se realizó una descripción general de marco tectónico, la topografía y batimetría de la zona de estudio. En la Metodología se describen las etapas en las que se desarrolló el proyecto, lo que hace que la investigación sea reproducible. En los resultados se plasma el producto obtenido de las distintas pruebas realizadas en el simulador. En la discusión de resultados se describe las características principales de los casos que se simularon, así como los resultados numéricos del área que resulta afectada por la inundación de un tsunami.

II. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un simulador numérico que estime, el alcance territorial de una inundación producida por un tsunami de origen tectónico en la costa sur de Guatemala.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar las variables principales que definen la generación y propagación de un tsunami mediante la investigación teórica de los mismos.
2. Seleccionar el modelo matemático más adecuado para describir la generación y propagación de un tsunami teniendo en cuenta investigaciones realizadas en otros países.
3. Simular la inundación causada por un tsunami a través de la implementación de un algoritmo basado en el modelo matemático seleccionado, utilizando herramientas de software de código abierto.
4. Mostrar el área territorial estimada que afectaría un tsunami en la costa sur de Guatemala, basado en los resultados de la aplicación del modelo matemático seleccionado.

III. JUSTIFICACIÓN

En la región de Centroamérica, se han identificado 49 tsunamis en los últimos 500 años, de estos 37 ocurrieron en el Pacífico, relacionados con la zona de subducción entre las placas de Cocos-Caribe, siendo 7 los que ocasionaron daños; y 12 ocurrieron en el Caribe, asociados a los sistemas de fallas Norteamérica-Caribe y el Cinturón deformado del Norte de Panamá, de los cuales, tres ocasionaron daños.

Una estimación empírica sobre el peligro de tsunamis indica que el 43% de los eventos sísmicos con magnitud superior a los 7.0 grados Richter a lo largo del Pacífico en Centroamérica generan tsunamis. En el Pacífico, la costa de Guatemala a Nicaragua tiene un 32% de probabilidad de que se generen tsunamis luego de un evento sísmico fuerte, mientras que la costa de Costa Rica a Panamá tiene un 67% de probabilidad. El 60% de la población centrada en la costa del Pacífico está expuesta al impacto de tsunamis. Esta estimación también sugiere que las áreas con mayor potencia de tsunami en el Pacífico son las costas de Nicaragua a Guatemala y la parte central de Costa Rica. Por lo que, los terremotos con magnitud superior a 7.0 grados Richter con epicentros en alta mar o en tierra (cerca de la costa) podrían desencadenar tsunamis que podrían afectar estas zonas.

La participación de la comunidad científica y académica es importante al proporcionar soluciones científicas y técnicas que sean de ayuda a las entidades gubernamentales para desarrollar sistemas de alerta temprana. Uno de los componentes básicos de dichos sistemas es la parte oceanográfica, que comprende mareógrafos para el monitoreo del nivel del mar en tiempo real o cerca de tiempo real, y de esta forma verificar la generación de un tsunami y evaluar la severidad de este a través de soluciones tecnológicas que permitan simular dicho tsunami desde su generación hasta su propagación y arribo a las zonas costeras. De esta forma se obtienen resultados que emitan alertas a las autoridades y así determinar las acciones que correspondan.

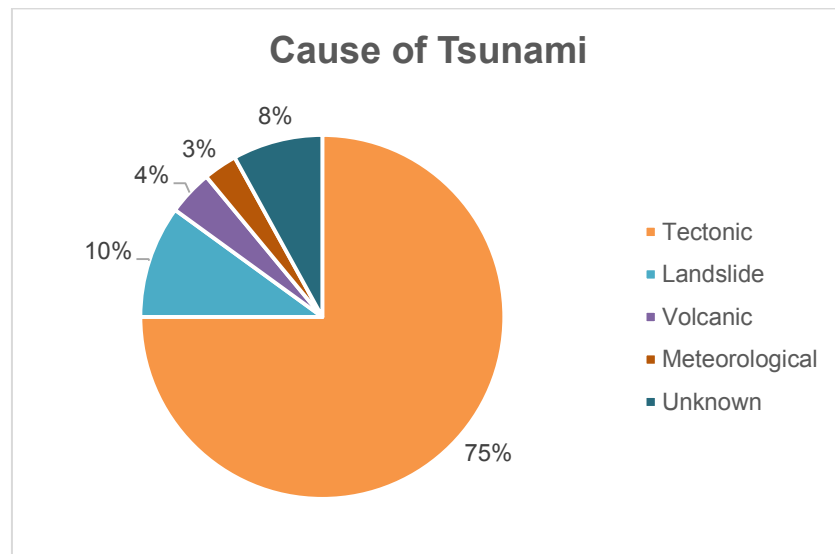
Por lo descrito anteriormente, con este trabajo de graduación se propone diseñar y desarrollar un simulador numérico de tsunamis en una versión inicial, que permita simular la generación y propagación de un tsunami y la inundación que causaría en la zona costera del sur de Guatemala, a partir de datos que describan las características de un sismo que tenga la probabilidad de originar un tsunami. De esta forma, se contribuiría a las entidades gubernamentales encargadas de la prevención de desastres en el país, para complementar la parte oceanográfica y apoyar la gestión de riesgos en un sistema de alerta temprana ante tsunamis. Además, puede ser de ayuda a organizaciones no gubernamentales para crear una cultura de prevención, y crear conciencia en las comunidades costeras que sean vulnerables a tsunamis.

IV. MARCO TEÓRICO

A. TSUNAMIS

1. **Mecanismos generadores.** Los análisis de la distribución de los acontecimientos históricos de tsunamis y las diferentes fuentes que los generan se basan en el contenido de la base de datos de NTL/ICMMG, ya que la base de datos NGDC/NOAA utiliza una clasificación diferente para las fuentes de tsunamis. La mayoría de tsunamis conocidos (el 75% de los todos los casos históricos) son generados por terremotos de poca profundidad capaces de transferir la energía suficiente a la columna de agua situada por encima. Los casos restantes se dividen entre deslizamientos de tierra (10%), origen volcánico (4%) y tsunamis meteorológicos (3%) (Figura 1). Mientras que el 8% de casos restantes, aún tiene sus causas indefinidas ya que se registraron al percibir una actividad inusual de las olas cerca de la costa, pero no se pudieron asociar con ninguna fuente potencial. La mayoría de ellos, fueron eventos débiles que no causaron daños (Gusiakov, 2008).

Figura 1 Ocurrencia de tsunamis históricos en función de las diferentes fuentes que los generan



(Gusiakov, 2008)

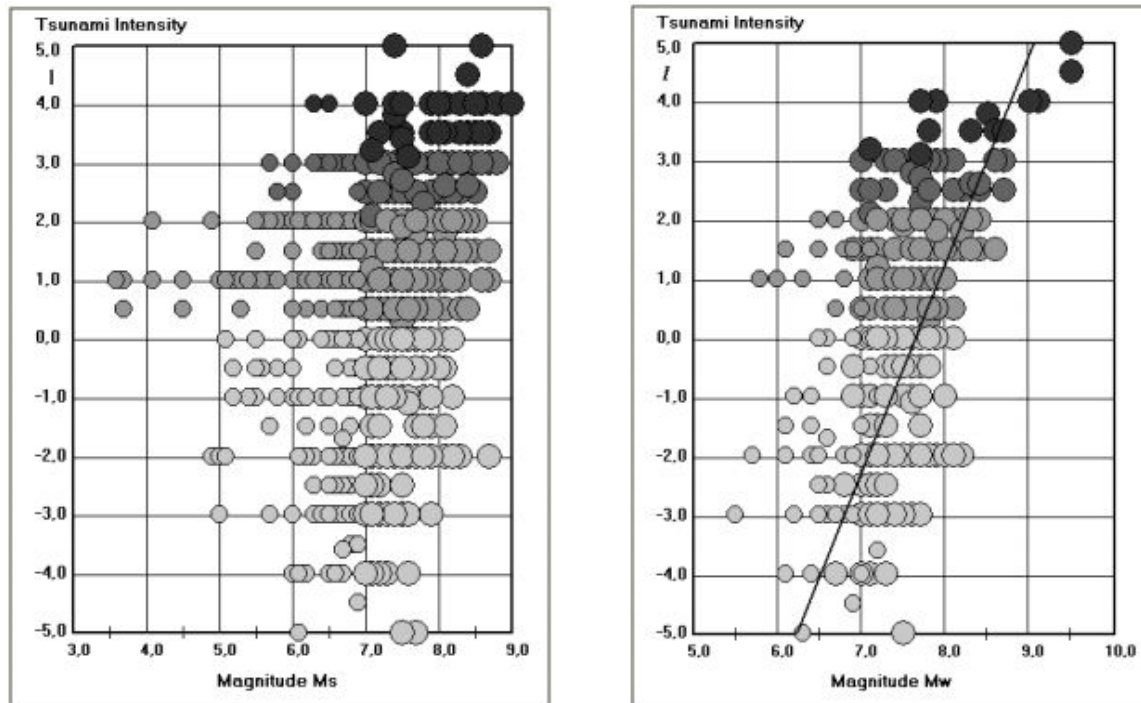
a. **Tsunamis sismogénicos.** Los tsunamis sismogénicos son generados por terremotos submarinos debido a la deformación co-sísmica de gran escala en el fondo marino y el impulso dinámico transformado a una columna de agua por compresión de olas. La magnitud de un tsunami generado por un terremoto se relaciona con la liberación de energía (la magnitud del terremoto), el mecanismo fuente, velocidad de ruptura de la falla y la profundidad del agua en la región de origen. Pero incluso en los casos

más favorables, la energía transferida a las olas de un tsunami es de orden de 1% de la energía total liberada por un terremoto (Gusiakov, 2008).

Un aspecto interesante a considerar en los tsunamis sismogénicos es su posible máximo recogimiento previo de las aguas en la costa. Los datos históricos sugieren que este valor alcanza como máximo de 35 m. a 50 m. incluso para los terrenos submarinos más grandes. Los máximos recogimientos previos que se ha registrado, son el del tsunami de 1771 en Ishigaki, el tsunami de 1788 en Sanah-Kodyak y el tsunami 1737 en Kamchatka, con valores entre 60 a 70 m. aunque estos no son del todo certeros (Gusiakov, 2008).

Otro aspecto importante de los tsunamis sismogénicos es la dependencia del recogimiento previo resultante con la magnitud de la fuente del tsunami. Aquí se usó un promedio en los valores de recogimiento previo en la costa para calcular la intensidad del tsunami I en la escala Soloviev-Imamura porque estos valores promedio son menos dependientes de una topografía costal particular y esto proporciona estimados más estables sobre la intensidad del tsunami. La dependencia entre la intensidad de un tsunami con la magnitud de un terremoto se muestra en la Figura 2, para la magnitud de ondas superficiales M_s y para magnitud de momento M_m (Gusiakov, 2008).

Figura 2 Dependencia entre la intensidad de un tsunami con la magnitud de un terremoto, para la magnitud de ondas superficiales M_s y para magnitud de momento M_m



(Gusiakov, 2008)

Ambos diagramas demuestran que existe poca o ninguna dependencia entre la intensidad del tsunami con la magnitud del terremoto que lo originó. Esta falta de correlación directa hace difícil la tarea de crear alertas operacionales de tsunami basadas solamente en datos sísmicos. Por otra parte, la dispersión de los datos es considerable y supera los seis grados en la escala de intensidad del tsunami, mostrando múltiples razones para esta dispersión: en primer lugar, hay una diferencia en la profundidad y el mecanismo que lo origina. En segundo lugar, existen diferencias en la zona de origen, como mares marginales, zonas de subducción, aguas profundas en la placa oceánica, etc. Y, en tercer lugar, y quizá el más importante, el grado de implicación que tienen los mecanismos secundarios, como deslizamientos submarinos y depresiones, en el proceso de generación de tsunamis (Gusiakov, 2008).

b. Tsunamis generados por deslizamientos. No son tan frecuentes como los tsunamis sísmicos, pero son muy comunes alrededor del mundo. Estos tsunamis son generados debido a los deslizamientos de roca o hielo que cae al agua o los deslizamientos de tierra submarinos o depresiones. Producen salpicaduras extremadamente altas, pero no se extienden ampliamente a lo largo de la costa. En general, la energía de un tsunami generado por un derrumbe se disipa rápidamente a medida que las olas del tsunami se alejan de la fuente. Uno de los casos más recientes en los que un deslizamiento ha generado un tsunami es el de 1998 en Papúa Nueva Guinea, cuando se observaron olas de 15 m. de altura luego de un terremoto con magnitud de 7.0 grados Richter. Las olas generadas por deslizamientos no se producen solamente en los mares y océanos, también representan un peligro en puertos, lagos e incluso grandes ríos que pueden poner vidas en peligro, causan que las presas se rebalsen o bien, destruyen propiedades que se encuentren a la orilla de estos (Gusiakov, 2008).

En caso de que el deslizamiento surja por un terremoto fuerte, las olas que se producen son particularmente peligrosas ya que arriban en cuestión de pocos minutos luego del terremoto, sin dejar tiempo para una evacuación. Algunas de estas olas son bastante destructivas y resulta en daños económicos considerables y numerosas pérdidas humanas (Gusiakov, 2008).

Un primer indicador para asociar la generación de un tsunami con un mecanismo de deslizamientos se da cuando hay ausencia de cualquier actividad sísmica. Los datos históricos reportan un promedio de 10 a 15% de estos eventos. Un segundo indicador es el tamaño del recogimiento previo que sucede. Ya que, según simulaciones numéricas, para un terremoto con magnitud entre los 7.00 y 7.5 grados Richter, el recogimiento previo excede los 3 m. Por lo que, un tsunami con recogimiento previo superior a 5 m. que sea resultado de un terremoto con magnitud menor a 7.5 grados, puede ser considerado como sospechoso en términos de que haya sido provocado por un mecanismo de deslizamiento (Gusiakov, 2008).

c. Tsunamis volcánicos. Aunque son muy poco frecuentes, los tsunamis generados por erupciones volcánicas pueden ser extremadamente destructivos y devastadores en el área donde se originan

y pueden resultar en numerosas pérdidas. Hasta el tsunami del océano Índico de 2004, el tsunami de 1883 en Krakatau estaba en la cima de la lista de los tsunamis más letales conocidos históricamente. La erupción formó una caldera explosiva con 18 a 20 km³ de material eruptivo, dando lugar a olas de tsunami de 35 a 40 m. de altura que inundaron la costa de Sunda Strait donde murieron 36,416 personas. Estas erupciones históricas han sido altamente explosivas donde el colapso de la caldera dio lugar al mecanismo para generar el tsunami. Las erupciones más pequeñas que se dan en islas o volcanes costeros generan un tsunami significativo si se acompañan con la falta de la pendiente del volcán (Gusiakov, 2008).

Los volcanes activos son estructuras dinámicamente inestables cuyo crecimiento y desarrollo incluye por lo general episodios de inestabilidad y fallo estructural. Los volcanes en crecimiento pueden volverse inestables y experimentar un colapso en cualquier escala por diferentes razones, algunas de ellas son fuertes lluvias, la erosión de la base del volcán, la deformación e inclinación de la base del volcán, o los temblores; por lo que una erupción no es la única razón para un colapso (Gusiakov, 2008).

Los tsunamis volcanogénicos también se pueden producir en lagos. Donde el tamaño del recogimiento previo está basado en la evidencia de la erosión del suelo que es claramente visible en la orilla del lago. Las erupciones submarinas también pueden generar tsunamis si se producen a unos 500 o 1000 m. de profundidad. El evento más grande conocido de este tipo se produjo en 1781 cerca de Sakurajima, en la isla Kuyushu, en Japón. Según los datos históricos, hay cerca de 100 casos de tsunamis volcánicos, que representan aproximadamente el 4% de todos los tsunamis históricos. Sin embargo, su tasa de mortalidad es casi el doble que el de los tsunamis sismogénicos. Sin embargo, la mayoría de ellos no pueden transportar la energía a través de largas distancias ya que las erupciones volcánicas son fuentes puntuales e inicialmente las grandes olas pierden su energía rápidamente con la distancia (Gusiakov, 2008).

d. Tsunamis meteorológicos. Estas oscilaciones de tipo seiche (onda estacionaria que afecta a un cuerpo de agua encerrado o parcialmente encerrado) son generados por algunas perturbaciones atmosféricas de gran escala como un frente de presión atmosférica que se mueve rápidamente sobre un cuerpo de agua poco profundo casi a la misma velocidad que un tsunami permitiendo que el aire y el agua se acoplen (Gusiakov, 2008).

Es importante resaltar que los tsunamis meteorológicos deben distinguirse de un fenómeno más común, las mareas de tormenta, que se producen en muchas zonas costeras vulnerables a los huracanes y tifones. Estas mareas son resultado de la elevación hidrostática del agua debido a la baja presión en el centro del ciclón que se amplifica por la oleada dinámica causada por una fuerte presión del viento (Gusiakov, 2008).

La principal diferencia entre estos fenómenos está en sus períodos y duración. Las olas observadas durante una marejada tienen una longitud de onda más corta, pero la inundación de las costas puede durar

desde varias horas hasta varios días y por lo general está acompañada por fuerte viento y lluvia intensa. Mientras que un tsunami meteorológico tiene una duración de 15 minutos a varias horas y por lo general se produce en tiempo de calma (Gusiakov, 2008).

e. Casos inusuales de perturbaciones de agua similares a tsunamis. Los tsunamis y perturbaciones de agua similares a tsunamis pueden ocurrir no solo en mares y océanos, sino también en cualquier depósito de agua siempre que su superficie o interior experimente alguna perturbación de gran escala. Un caso interesante fue el tsunami de olas de 2 metros generado por deslizamiento de tierra en el Lago Coatepeque, El Salvador. Este se dio poco después de un terremoto de magnitud 7.6 que se produjo el 13 de enero de 2001 en el Pacífico, a 50 km. de la costa. Aunque vale la pena mencionar que este terremoto no generó un tsunami significativo en la costa del Pacífico, cerca de la zona del terremoto (Gusiakov, 2008).

2. Características físicas de un tsunami. De acuerdo al boletín del NOAA llamado “Great Waves” se dice que “las olas de un tsunami se diferencian de las olas normales del océano en la gran distancia existente entre sus crestas, con frecuencia, superior a 100 km en las profundidades del océano, y en el tiempo transcurrido entre ellas, que puede cifrarse entre 10 minutos y una hora. Cuando llegan a las aguas menos profundas de la costa, las olas frenan su avance, y el agua que se acumula tras ellas crea una muralla devastadora de decenas de metros de altura. (...) Algunos tsunamis de gran tamaño han llegado a elevarse por encima de los 30 metros. Pero incluso un tsunami de entre 3 y 6 metros de altura puede ser muy destructivo y saldarse con numerosos muertos y heridos.” (Comisión Oceanográfica Intergubernamental, 2014)

Una de las características principales de un tsunami es la longitud de onda de sus olas. Debido a esto, las olas siempre tocan el fondo (son refractadas), ya que la profundidad siempre es inferior a la mitad de la longitud de onda, este es el valor crítico que separa a las olas de agua profunda de las olas de aguas someras (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a). La velocidad de ola depende de la longitud de onda y la profundidad del agua. Mientras avanza a aguas someras, su longitud de onda y velocidad de propagación disminuye, causando que la amplitud incremente. La longitud de onda inicial en profundidad, es determinada por la naturaleza y tamaño de la perturbación que produce el tsunami (Hyperphysics & Nave, 2012a). La velocidad de ola se describe en la ecuación (1).

$$V = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(2\pi \frac{d}{\lambda}\right)} \quad (1)$$

Donde:

λ = longitud de onda

d = profundidad

g = aceleración de gravedad $\left(\frac{9.81m}{s^2}\right)$

En aguas profundas, la tangente hiperbólica de la expresión tiene a 1, por lo que el primer término en la raíz cuadrada determina la velocidad en aguas profundas. Los límites de la función $\tan(x)$ son:

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \tanh\left(d \frac{2\pi}{\lambda}\right) \approx 1 \quad (2)$$

$$\lim_{d \rightarrow 0} \tanh\left(d \frac{2\pi}{\lambda}\right) \approx d \frac{2\pi}{\lambda}$$

Por lo tanto, la velocidad de propagación del tsunami puede ser calculada de la siguiente manera:

$$V = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \text{ para aguas profundas, } d < \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

$$V = \sqrt{gd} \text{ para aguas poco profundas, } d < \frac{\lambda}{20} \quad (4)$$

(Hyperphysics & Nave, 2012b)

Para el océano Pacífico la profundidad media es de 4,000 m., lo que da una velocidad de propagación promedio de 198 m/s o 712.8 km/h. De este modo, si la profundidad de las aguas disminuye, la velocidad del tsunami decrece (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a).

Tabla 1 Velocidad de propagación de tsunamis en función de la profundidad

Profundidad (m)	Velocidad (nudo = 1.85 km/h)	Velocidad (km/h)	Longitud de onda (km)
7000	509.73	943	282
4000	385.41	713	213
2000	272.43	504	151
200	85.95	159	48
50	42.70	79	23
10	19.46	36	10.6

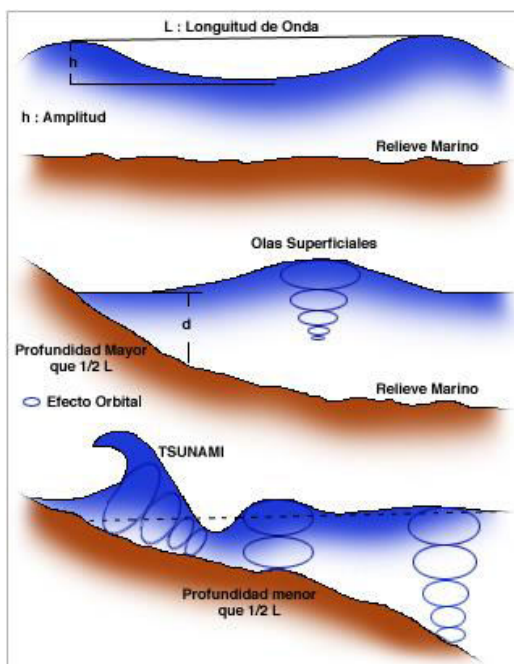
(Hyperphysics & Nave, 2012a)

Cuando las profundidades son muy grandes, la onda del tsunami alcanza gran velocidad, y la altura de la ola al llegar a la costa es variable, ya que la altura de la ola es inversamente proporcional a la profundidad. Por lo que, en zonas profundas, la altura de la ola es muy pequeña y se confunde con las variaciones normales del nivel medio del mar, pero en zonas poco profundas llega a alcanzar varios metros de altura (INSIVUMEH, 2015). Al aproximarse a las aguas bajas, las olas sufren fenómenos de refracción y disminuyen su velocidad y longitud de onda, aumentando su altura (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a). Por lo que se ha observado que las bahías y golfos son más propensos a sufrir el efecto de un tsunami debido a la geomorfología de sus costas (INSIVUMEH, 2015).

Es posible trazar cartas de propagación de tsunamis, como se hace con las cartas de olas; la diferencia es que los tsunamis son refractados en todas partes por las variaciones de profundidad, mientras que con las olas ocurre solo cerca de la costa. Sus características difieren notablemente de las olas generadas por el viento. Toda onda tiene un efecto orbital que alcanza una profundidad igual a la mitad de su longitud de onda; así, una ola generada por el viento solo en grandes tormentas puede alcanzar unos 300 m. de longitud de onda, lo cual indica que ejercerá efecto hasta 150 m. de profundidad (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a).

Los tsunamis tienen normalmente longitudes de onda que superan los 50 km. y llegan a alcanzar hasta 1000 km., en tal caso, el efecto orbital es constante y vigoroso en cualquier parte del fondo marino, ya que no existen profundidades semejantes en los océanos (Figura 3) (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a).

Figura 3 Parámetros físicos y geométricos de la onda de tsunami



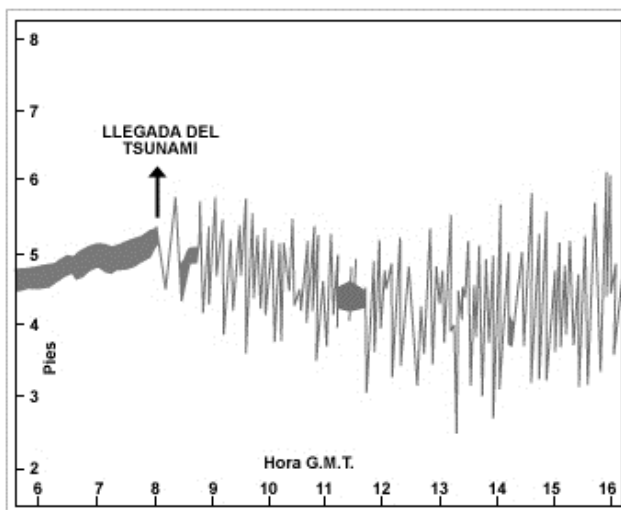
(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a)

La longitud de onda L de un tsunami corresponde al producto entre la velocidad de propagación V y el periodo T , relación dada por:

$$L = VT \quad (5)$$

Debido a su gran longitud de onda, el desplazamiento de un tsunami a grandes profundidades se manifiesta en la superficie oceánica con amplitudes tan solo de unos pocos centímetros. Las olas generadas por los vientos tienen periodos, por lo general, de menos de 15 segundos, a diferencia de las ondas de tsunami que oscilan entre 20 y 60 minutos (Tabla 2). Esta característica permite diferenciarlas claramente en un registro mareográfico (Figura 4) y, por lo tanto, advertir la presencia de un tsunami (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a).

Figura 4 Registro mareográfico que permite advertir la presencia de un tsunami



(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a)

Tabla 2 Principales características entre una ola de tsunami y una ola común

Característica	Tsunami	Ola común
Longitud de onda	De 50 a 1000 km	90 m. en el océano Atlántico, 300 m. en el océano Pacífico
Velocidad máxima	> 900 km/h	> 100km/h
Período	De 10 a 90 minutos	< 15 s
Altura o amplitud		
Mar adentro	Pocos centímetros	< 13 m.
Costa	1 – 30 m.	6 m.
Influencia en el fondo	Perturbación en el fondo	Ninguna, solo en la playa

(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a)

3. Impacto de un tsunami. La magnitud de los efectos de un tsunami en áreas costeras, dependerá de un conjunto de factores físicos y de la existencia o no de grupos de personas asentadas en el área.

a. Escalas de intensidad de tsunamis. Diversos autores han creado escalas descriptivas y cuantitativas para expresar la magnitud de un tsunami.

1) Escala Sieberg de intensidades de tsunami. Escala descriptiva de la intensidad de tsunamis publicada originalmente en 1923; y modificada posteriormente en la escala de Sieberg-Ambraseys por Ambraseys creada en 1962 (UNESCO, 2013). Descrita en la Tabla 3.

Tabla 3 Escala Sieberg de intensidades de tsunamis

Grado	Magnitud	Descripción
I	Muy suave	La onda es tan débil que sólo es perceptible en los registros de los mareógrafos.
II	Suave	Las ondas son percibidas por aquellos que viven a lo largo de la costa y están familiarizados con el mar. Normalmente se percibe en costas muy planas.
III	Bastante fuerte	Generalmente es percibido. Inundación de costas de pendientes suaves. Embarcaciones deportivas pequeñas son arrastradas a la costa. Daños leves en estructuras de material ligero situadas cerca de las costas. En estuarios, se invierten los flujos de los ríos hacia arriba.
IV	Fuerte	Inundación de la costa hasta determinada profundidad. Daños de erosión en rellenos construidos por el hombre. Terraplenes y diques dañados. Las estructuras de material ligero cercanas a la costa son dañadas. Las estructuras costeras sólidas sufren daños menores. Embarcaciones grandes y pequeños buques son derivados tierra adentro o mar afuera. Costas cubiertas con desechos flotantes.
V	Muy fuerte	Inundación general de la costa hasta determinada profundidad. Los muros de embarcaderos y estructuras sólidas cercanas al mar son dañadas. Las estructuras de material ligero son destruidas. Severa erosión de tierras cultivadas y la costa se encuentra cubierta de desechos flotantes y animales marinos. A excepción de los grandes barcos, todo tipo de embarcación es llevada tierra adentro o hacia el mar. Grandes ascensos de agua en ríos estuarios. Instalaciones portuarias resultan dañadas. Gente parece ahogada. Las olas van acompañadas de un fuerte rugido.
VI	Desastroso	Destrucción parcial o completa de estructuras artificiales a determinada distancia de la costa. Grandes inundaciones costeras. Buques grandes severamente dañados. Árboles arrancados de raíz o rotos. Muchas víctimas.

(UNESCO, 2013)

2) Escala de intensidad de Imamura. En 1979, Imamura propone una escala basada en la altura de la ola y los daños que produce en áreas costeras (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b). El grado de tsunami está clasificado en la Tabla 4.

Tabla 4 Escala de intensidad de tsunami según Imamura

Grado de tsunami (M)	Altura de la ola (m)	Descripción de los daños
0	1 – 2	No produce daños.
1	2 - 5	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados.
2	5 – 10	Personas, embarcaciones y casas son barridas.
3	10 – 20	Daños extendidos a lo largo de 400 km la costa.
4	>30	Daños extendidos a lo largo de 500 km de la línea costera

(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b)

3) Escala de intensidad de Lida. En 1963, Lida propone otra escala de intensidad, donde relaciona la máxima altura de subida que alcanza la ola en tierra ($R = \text{runup}$), medida sobre el nivel medio del mar: y la energía de los tsunamis correspondiente a diferentes grados de intensidad (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b). Esta escala se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Escala de intensidad de tsunami según Lida

Grado del tsunami	Energía	Máxima altura de inundación R (m)
5.0	25.6×10^{23}	> 32
4.5	12.8×10^{23}	24 - 32
4.0	6.4×10^{23}	16 - 24
3.5	3.2×10^{23}	12 - 16
3.0	1.6×10^{23}	8 - 12
2.5	0.8×10^{23}	6 - 8
2.0	0.4×10^{23}	4 - 6
1.5	0.2×10^{23}	3 - 4
1.0	0.1×10^{23}	2 - 3
0.5	0.05×10^{23}	1.5 - 2
0.0	0.025×10^{23}	1 - 1.5
-0.5	0.0125×10^{23}	0.75 - 1
-1.0	0.006×10^{23}	0.50 - 0.75
-1.5	0.003×10^{23}	0.30 - 0.50
-2.0	0.0015×10^{23}	< 0.30

(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b)

4) Escala de intensidad de Wiegel. En 1970, Wiegel combinó las escalas propuestas por Imamura y Lida, adicionando la escala de Imamura con la cota máxima de inundación R, definida por Lida. Como la escala de Lida se extiende desde magnitud =-2 hasta magnitud =5 y además contiene grados intermedios, la adaptación de la variable R a la escala de Imamura se presenta con intervalos discontinuos. Así, la magnitud M de un tsunami es clasificada de acuerdo a lo estipulado en la Tabla 6 (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

Tabla 6 Escala de grados de tsunami según Imamura, Lida y transcrita por Wiegel

Grado de tsunami (M)	Altura de la ola (m)	Cota máxima de inundación R (m)	Descripción de los daños
0	1 – 2	1 – 1.5	No produce daños
1	2 - 5	2 – 3	Casas inundadas y botes destruidos son arrastrados
2	5 – 10	4 - 6	Personas, embarcaciones y casas son barridas
3	10 – 20	8 – 12	Daños extendidos a lo largo de la costa
4	>30	16 - 24	Daños extendidos a lo largo de la línea costera

(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b)

b. Poder destructor de un tsunami. La fuerza destructiva de un tsunami en áreas costeras depende de la combinación de los siguientes factores:

- Magnitud del fenómeno que lo induce. En caso de ser un sismo submarino, se debe considerar la magnitud y profundidad de su foco.
- Influencia de la batimetría en la propagación del tsunami.
- Distancia a la costa desde el punto donde ocurrió el fenómeno (epicentro).
- Configuración de la línea de costa.
- Influencia de la orientación del eje de una bahía respecto al epicentro (características direccionales).
- Presencia o ausencia de corales o rompeolas, y el estado de la marea al tiempo de la llegada del tsunami.
- Influencia de la topografía en la superficie, incluyendo pendientes y grado de rugosidad derivado de construcciones, árboles y otros obstáculos en tierra.

(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b)

c. Efectos de un tsunami en la costa. Cuando un tsunami arriba a una costa, este se manifiesta a través de un cambio inusual en el nivel del mar, por lo general se presenta un aumento y un recogimiento previo de las olas; esta última situación deja descubiertas grandes extensión del fondo marino.

Posteriormente, se produce una sucesión rápida y acentuada de ascensos y descensos de las olas, cuya altura varía entre 1 y 4 m., aunque según datos históricos, existen casos puntuales en que las olas alcanzaron alturas superiores a los 20 m (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

La ola de un tsunami acumula gran cantidad de energía; al llegar a la línea costera, esta ola avanza sobre la tierra alcanzando alturas importantes sobre el nivel medio del mar. La ola y el flujo que le sigue, cuando encuentra un obstáculo, descargan su energía impactando con gran fuerza. La dinámica de un tsunami en tierra es bastante compleja y por lo normal, no es predecible; esto se debe a que influyen factores muy diversos como: el período, la altura de la ola, la batimetría y la topografía determinando daños de diversa intensidad (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

Los efectos de un tsunami varían dependiendo de la duración del período. Con un período corto, la ola llega a tierra con una fuerte corriente; y con periodo largo, se produce una inundación lenta con poca corriente. Por otra parte, mientras mayor sea la altura de la ola, mayor es la energía acumulada; por lo tanto, dependiendo de la pendiente y la geomorfología del terreno, mayor será la extensión de las áreas inundadas. Al respecto, estudios japoneses han determinado que mientras menor es la pendiente de la ola (razón entre la altura y la longitud de onda) mayor será la altura máxima de inundación (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

Por otra parte, las variaciones en las formas y las pendientes de la batimetría cercana a la línea de costa influyen directamente en el potencial de energía del tsunami, lo que provoca amplificación o atenuación de las olas. Así, una costa que tenga una plataforma continental escalonada con bruscos cambios de pendiente, hará que la ola del tsunami pierda gradualmente su energía cinética y, por tanto, potencial. Esto se debe a los choques sucesivos de la masa de agua con el fondo marino. Las olas van disipando su energía en las paredes con los cambios bruscos de profundidad (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

En tanto, una costa con topografía de pendiente suave, en que la plataforma continental penetra suavemente en el mar, permitirá que la energía del tsunami sea transmitida en su totalidad, y, por lo tanto, se incrementa el poder destructivo del mismo. Estas son costas de alto riesgo con olas de gran altura que producen inundación. En este caso, la pérdida de energía es solo por roce (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

En las bahías puede haber reflexión en los bordes de las costas; en este caso, si el periodo es igual o un múltiplo al tiempo que demora en recorrer la bahía, al llegar la segunda ola puede verse reforzada con un remanente de la primera y aumentar la energía al interior de la bahía. La topografía de las tierras emergidas influye directamente en la penetración del tsunami en superficie. Cuando la pendiente es relativamente fuerte, la extensión de la zona inundada no es significativa, en cambio, cuando el terreno es plano o con una

pendiente baja, la penetración abarca kilómetros de terreno adentro (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

4. **Daños causados por tsunamis.** Los daños típicos producidos por tsunamis se agrupan de acuerdo con lo siguiente:

a. **Daños producidos por el momento de flujo.** Los daños producidos por efecto de torque o momento, se originan cuando la masa de agua del frente del tsunami seguido por una fuerte corriente, impacta el espacio construido y su entorno, caracterizado por estructuras de diversas dimensiones, árboles y otros objetos. El impacto del tsunami demuestra su fuerza destructiva, la cual, se refuerza por la colisión de los objetos arrastrados por la corriente (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

Cuando la masa de agua fluye de vuelta al mar, los escombros arrastrados fortalecen la fuerza del empuje del flujo que irrumpe, causando así, la destrucción de las estructuras debilitadas por la primera embestida. En algunas ocasiones, la magnitud del momento del flujo es muy alta, que es capaz de arrastrar tierra adentro barcos de elevado tonelaje. Cabe señalar que los daños originados por esta causa son más severos en las bahías en forma de V, cuando son azotadas por tsunamis de periodos cortos (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

b. **Daños producidos por la inundación.** Si el flujo no es de gran magnitud, cualquier objeto que no esté fuertemente ligado a su base en el terreno flotará por la inundación. En una gran extensión de terreno plano, la masa de agua puede encontrar un pasaje hacia el interior y, por diferencias de pendiente, el flujo de agua se acelera en ese pasaje barriendo con los elementos que encuentre a su paso (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

Por lo general, en estas inundaciones perecen animales y personas ahogados; los barcos y embarcaciones menores que estén atracados en muelles y puertos son arrastrados a tierra y terminan en áreas distantes a su localización inicial una vez que el flujo ha retrocedido (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

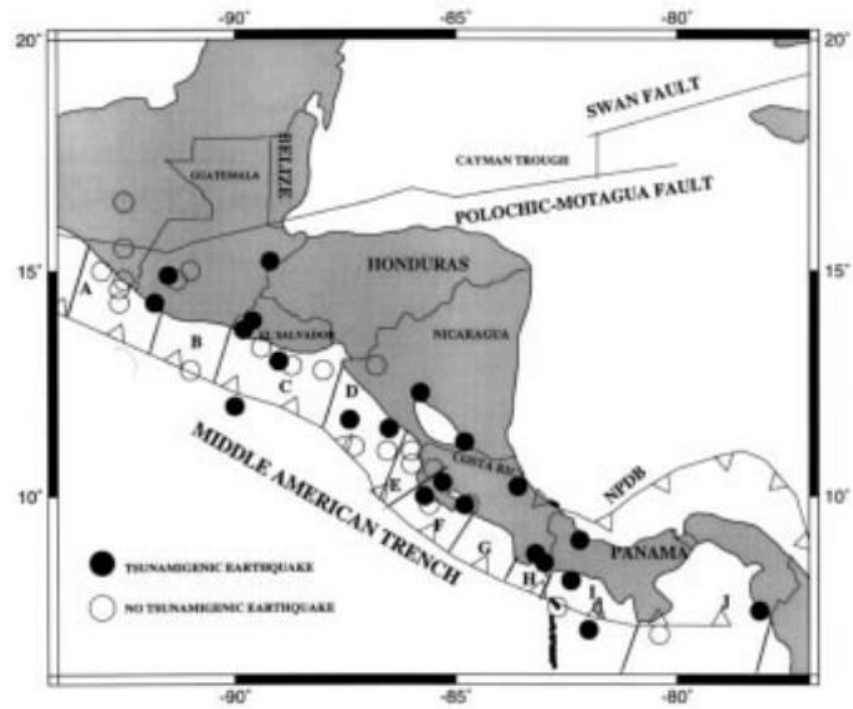
c. **Daños producidos por socavamiento.** Estos daños por lo general, se observan en infraestructuras portuarias. Cerca de la costa, la corriente del tsunami remueve el fango y arena del fondo del mar, socavando a veces con las bases de las estructuras de muelles y puertos. Si esto ocurre, estas estructuras caen al mar. el colapso de las estructuras se produce también cuando el reflujó socava los cimientos. La inundación que produce el tsunami socava los cimientos de las líneas de ferrocarril o carreteras, originando bloqueos de tráfico y demoras en rescates y trabajos de reconstrucción (Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012b).

5. Probabilidad de ocurrencia de tsunami en Centroamérica. En la Figura 5 se muestra la distribución de terremotos de magnitud > 7.0 ($M_s > 7.0$) o mayores a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica para eventos que ocurrieron el siglo pasado y que tenían epicentros en altamar o cerca de la costa. Los segmentos costeros con mayores tasas de ocurrencia de grandes terremotos son A y C que se localizan en el territorio México-Guatemala y Salvador-Honduras, respectivamente. Los datos de A, B y D indican que el segmento de la Fosa Mesoamericana, que se extiende desde Nicaragua a México genera más y mayores terremotos que el segmento de Costa Rica-Panamá. La única excepción es el segmento B, que podría ser una brecha sísmica. El segmento de Costa Rica-Panamá se caracteriza por tener una baja tasa de terremotos de gran magnitud, esto puede ser debido a que la subducción de la placa de Cocos se hace poco profunda en esa parte de la zanja (Fernandez, Molina, Havskov, & Atakan, 2000).

En la Figura 6 se muestra el total de terremotos fuertes con $M_s > 7.0$ y el total de terremotos tsunamigénicos para estimar la tasa de relación entre ellos y determinar las áreas de mayor peligro. Los resultados indican que el 20% de los grandes terremotos en la sección A generan tsunamis, 50% para la sección C y la sección D. En general, el 32% de los terremotos fuertes de Guatemala-Nicaragua ocurridos durante el siglo pasado han desencadenado tsunamis. En el segmento de Costa Rica-Panamá la situación es diferente: los terremotos fuertes no son tan frecuentes allí, pero el 67% de ellos desencadenan tsunamis. De acuerdo con los resultados de (Fernandez et al., 2000), las zonas sísmicas de los segmentos F, H, I y J tienen 60%, 100%, 67% y 50% de probabilidad, respectivamente, de generar un tsunami cuando un terremoto fuerte ocurre ahí.

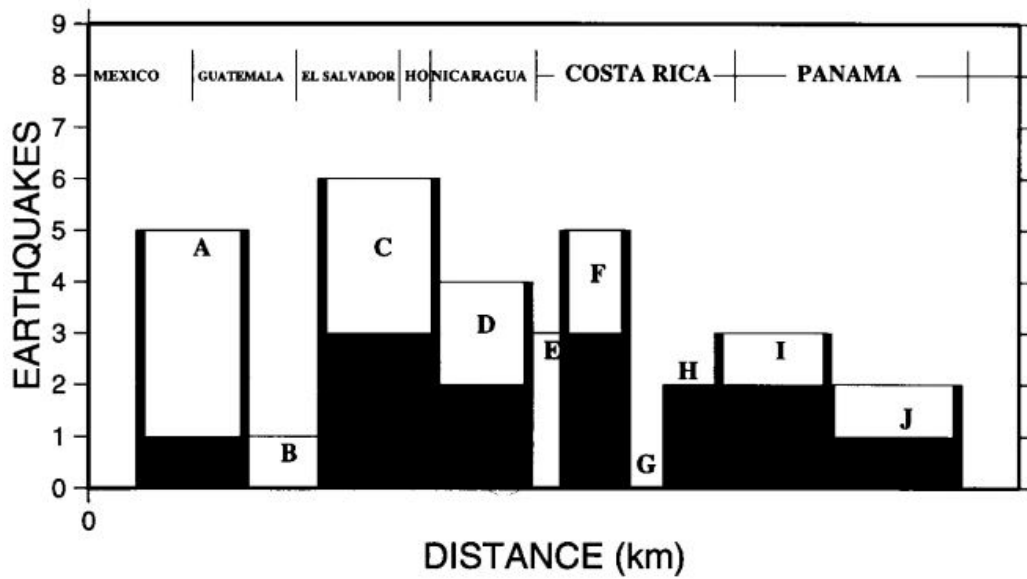
Esto significa que los terremotos de este segmento, aunque menos, son más efectivos para generar tsunamis que los del segmento de Guatemala-Nicaragua. Por lo que, el 45% de los terremotos fuertes localizados en alta mar o cerca de la costa centroamericana del Pacífico desencadenan tsunamis en esta región tsunamigénica (Fernandez *et al.*, 2000).

Figura 5 Distribución de terremotos de Ms > 7.0 o mayores a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica



(Fernandez *et al.*, 2000)

Figura 6 Frecuencia de terremotos de Ms > 7.0 o mayores a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica



(Fernandez *et al.*, 2000)

B. PROYECTOS DESARROLLADOS

1. **TSUSY (Tsunami Simulation System)**. Esta herramienta permite la propagación numérica de tsunamis en tiempo real. Fue desarrollada en el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IH Cantabria). Si existe un terremoto que genere un tsunami, esta herramienta ofrece datos relevantes en un breve espacio de tiempo. Proporciona mapas que recogen valores de tiempo de viaje de la ola de un tsunami desde el epicentro hasta la costa, así como un orden de magnitud de la altura máxima de ola que se espera en las diferentes zonas que resultarían afectadas por el tsunami (IH Cantabria, 2012).

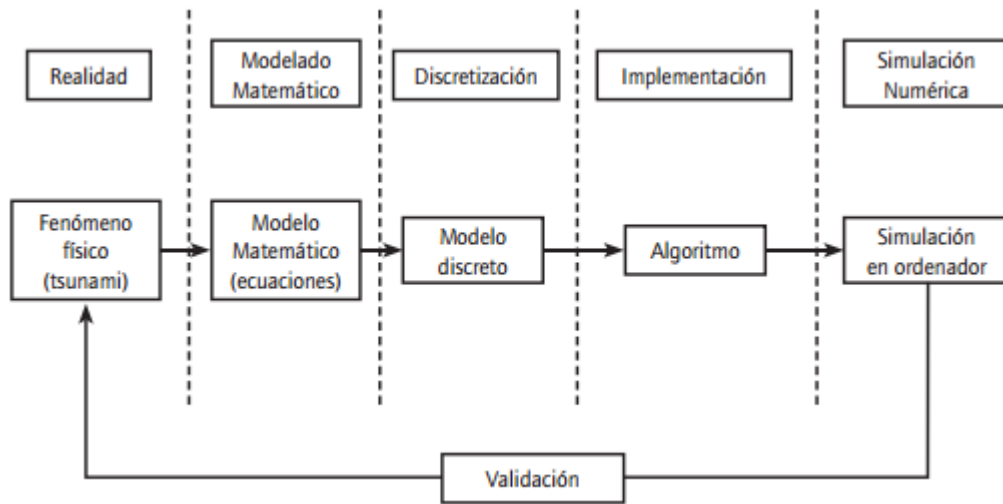
Para lograr esto, TSUSY emplea los parámetros que caracterizan a un terremoto y los que proporcionan el USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) momentos después de que ocurre un sismo. Con estos parámetros, TSUSY ejecuta el modelo C3, también desarrollado en el IH Cantabria, con base al modelo COMCOT. Este modelo resuelve las llamadas “ecuaciones de aguas someras” en una serie de mallas con la batimetría que engloban todos los océanos, para calcular los resultados ya mencionados en cualquier parte del mundo (IH Cantabria, 2012).

2. **Deslizamientos submarinos y tsunamis en el Mar de Alborán**. El proceso requerido para predecir la velocidad y amplitud de una ola producida, el tiempo de llegada a la costa y extensión de costa inundada por la masa de agua que mueve un tsunami consta de lo siguiente (Figura 7):

- Un profundo conocimiento de los diversos mecanismos de generación, propagación e inundación asociados a un tsunami.
- El modelado matemático de cada uno de estos mecanismos, mediante ecuaciones matemáticas.
- La discretización de las ecuaciones para pasar de un modelo continuo (que no se sabe resolver) a un sistema discreto para el que sí puede encontrar soluciones.
- El diseño de un algoritmo que permita implementar en un ordenador la resolución del modelo discreto anterior.
- La simulación o experimentación numérica que proporcionará valores aproximados de las variables que se quieren determinar
- La validación de los resultados.

(Sánchez, Fernández, & González, 2012)

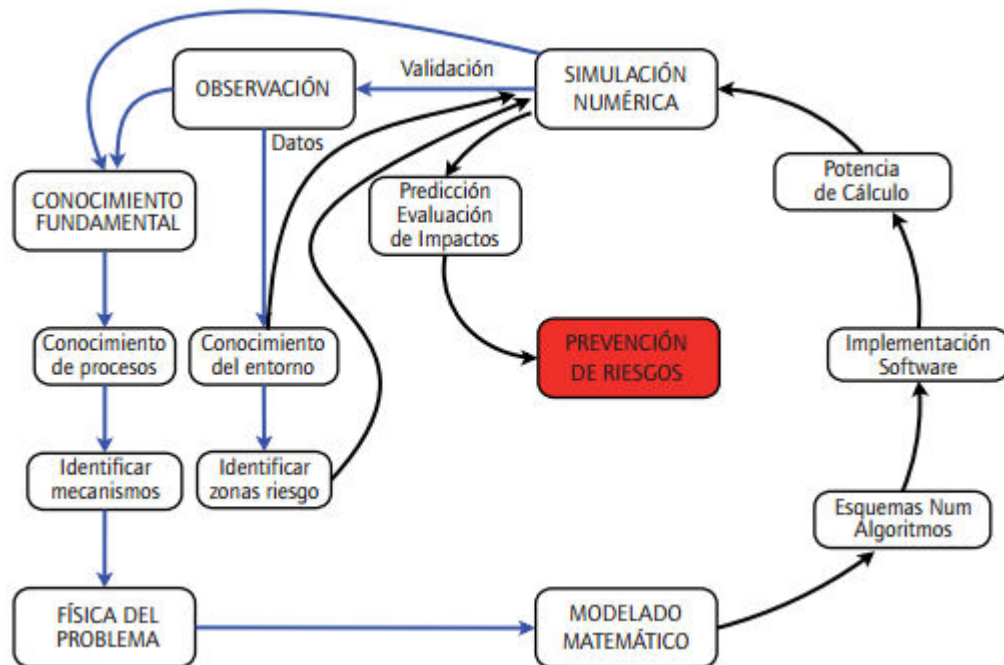
Figura 7 Diagrama esquematizando el proceso de Modelado Matemático y Simulación Numérica



(Sánchez *et al.*, 2012)

Una herramienta ideal de simulación y predicción sigue un proceso de desarrollo que comprende diversos aspectos (Figura 8)

Figura 8 Esquema de una herramienta de predicción y toma de decisiones



(Sánchez *et al.*, 2012)

Se realizaron los diferentes mapas batimétricos a partir de datos de buena calidad y alta resolución espacial los cuales, luego de ser procesados se exportaron a ArcGIS para realizar los mapas. Se realizó la extracción de la malla batimétrica y a partir de dicha malla se llevó a cabo con diferentes resoluciones, el modelo digital del terreno de la batimetría actual. A partir de estos datos se realizó una cartografía hipotética de la paleo-batimetría existente antes de la formación del cañón submarino y el depósito del abanico. Con las batimetrías y con la ayuda de ArcGIS se llevó a cabo un cálculo de volúmenes (Sánchez *et al.*, 2012).

Para completar la información batimétrica y topográfica del resto del Mar de Alborán se añadieron al modelo matemático los siguientes datos:

- Batimetría de muy alta resolución obtenida a través del empleo de un ecosonda.
- Datos topográficos y batimétricos para completar aquellas zonas donde no existen datos del ecosonda.
- Datos topográficos de la zona continental española.

(Sánchez *et al.*, 2012)

Como dato curioso, la cantidad de datos topo-batimétricos utilizados para la generación de la geometría del dominio de cálculo completo (tanto de zona marítima como terrestre) es superior a los 100 millones de puntos, ocupando un espacio en memoria de casi 3 GB (Sánchez *et al.*, 2012).

Para simular la evolución de un tsunami mediante un modelo matemático es necesario describir mediante ecuaciones los mecanismos que intervienen en cada una de sus tres fases:

- Inicio o generación.
- Desarrollo o evolución de la onda en la superficie del mar.
- Conclusión o inundación de zonas costeras.

(Sánchez *et al.*, 2012)

- Generación

La modelación y simulación numérica de esta fase es la más complicada de las tres etapas del desarrollo de un tsunami. Ya que se trata de un modelo determinista que desde el punto de vista matemático consiste en un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales (Sánchez *et al.*, 2012).

- Propagación

Una vez que se ha generado la onda de superficie es necesario modelar su propagación. Aquí se considera un modelo de tipo aguas poco profundas o aguas someras. Es posible aplicar este tipo de modelos simplificados cuando la escala espacial característica en la dirección vertical del fenómeno que se quiere simular es mucho menor que la escala horizontal característica. Estas ecuaciones, al resolverlas,

proporcionan valores aproximados del promedio vertical de las velocidades del fluido y de la elevación de la superficie del mar (Sánchez *et al.*, 2012).

- Inundación

Esta última fase se simula también mediante el mismo tipo de modelo de aguas someras que representa la propagación del tsunami. En este caso será necesario además de:

- Disponer de una descripción batimétrica y topográfica muy precisa de la zona costera.
- El modelo discreto y la implementación que se haga del mismo en el ordenador deben estar diseñados de forma adecuada para realizar el tratamiento de zonas seco-mojado.

Esto significa que el modelo debe ser capaz de simular correctamente el avance del agua sobre zonas inicialmente secas, así como la retirada del agua del mar de la zona inundada, una vez que la onda del tsunami disipa su energía tras el impacto (Sánchez *et al.*, 2012).

Para discretizar el modelo que se emplea en cada una de las tres fases, se ha utilizado un método de volúmenes finitos: la zona de estudio se divide en celdas de geometría sencilla. Este conjunto de celdas que recubren la zona de estudio se denomina malla. En cada una de las celdas se calculan los valores promedios de velocidades y elevaciones en una serie de instantes de tiempo, teniendo en cuenta las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento (Sánchez *et al.*, 2012).

3. Curso de simulación numérica de tsunamis del proyecto TIME “Tsunami

Inundation Modelling for Exchange”. El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) de Chile es responsable del funcionamiento y operación del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos. Por ello organizó un curso de entrenamiento de Simulación Numérica de Tsunamis en conjunto con el Departamento de Oceanografía Física del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México (CICESE) (UNESCO, 1996).

El curso es parte de la etapa de transferencia tecnológica del Proyecto TIME y se basa en los avances logrados por el Dr. Nobuo Shuto en el análisis de modelo numérico para la investigación de tsunamis en el campo cercanos, en la Universidad de Tohoku, Japón. El propósito de este proyecto es transferir la tecnología de la simulación numérica de tsunamis a países de América Latina cuyas áreas costeras se ven afectadas por estos fenómenos naturales, poniendo a su disposición asistencia técnica y software para elaborar cartas de inundación por tsunamis (UNESCO, 1996).

El objetivo del curso es describir y aplicar un modelo numérico para elaborar mapas de zonas costeras con riesgo de inundación debido a tsunamis locales generados en zonas de subducción de placas tectónicas (UNESCO, 1996).

Uno de los temas más importante durante el curso fue el repaso de las ecuaciones de la hidrodinámica como:

- Ecuación de conservación de masa
- Ecuación de conservación de momentum
- Aproximación hidrostática
- Modelo de aguas someras
- Ecuaciones de aguas someras
- Ecuación de onda
- Método de las características aplicado a las ecuaciones de onda

Además, también se contemplaron los Métodos de Integración Numérica como:

- Esquema de diferencias finitas
- Integración numérica de la ecuación de onda (caso unidimensional)
- Estabilidad numérica
- Integración numérica de la ecuación de onda (bidimensional)
- Integración numérica de los términos advectivos de las ecuaciones de aguas someras
- Integración numérica de los términos de fricción
- Condiciones iniciales y de frontera
 - Oscilaciones forzadas en una frontera abierta
 - Oscilaciones libres en una frontera abierta
 - Reflexión en una frontera cerrada
 - Condiciones de frontera móvil

(UNESCO, 1996)

Así como sus aplicaciones al modelo de Mansinha y Smylie para generar las condiciones iniciales de un tsunami eventual en la región de interés, y la aplicación de la ecuación de onda y de las ecuaciones de aguas someras, mediante el procedimiento de mallas anidadas, para estimar zonas con riesgo de inundación debido a tsunamis eventuales en las regiones de interés (UNESCO, 1996).

4. Dinámica y modelado numérico de tsunamis en cauce de ríos: aplicación al río

Rímac. Un modelo numérico es una representación teórica de un fenómeno natural. Los tsunamis son expresados típicamente de forma matemática a fin de generar escenarios de riesgo para una mayor comprensión del comportamiento y desarrollo del peligro. Si un tsunami se produce en una zona de

subducción, el comportamiento es controlado por las ecuaciones asociadas a la dinámica de fluidos y otros procesos geofísicos como la interacción entre las placas y el océano, la sismicidad, etc. En general, estas ecuaciones se expresan en diferenciales parciales, las cuales describen la evolución de las diferentes variables relevantes en función de los valores considerados como condiciones de contorno (Martínez, Tavera, & Instituto Geofísico del Perú, 2013).

El océano Pacífico tiene el más alto riesgo de presencia de terremotos y tsunamis por encontrarse dentro del “Cinturón de Fuego del Pacífico” (Figura 9). Por lo tanto, el océano Pacífico está estructural, topográfica y sísmicamente acondicionado para servir de campo adecuado para la liberación de las tensiones tectónicas, siendo así, el sistema generador de tsunamis más activo del planeta (Martínez *et al.*, 2013).

Figura 9 Ubicación del Cinturón de Fuego del Pacífico



(Martínez *et al.*, 2013)

Para modelar el proceso de generación, propagación e inundación de un tsunami, fueron necesarios los siguientes datos:

- Batimetría:
 - Global: para simular la grilla más grande donde se propaga el tsunami. Estos datos deben tener buena resolución.
 - Local: estos datos corresponden a una batimetría fina, obtenida a partir de sondajes realizados en la zona que se contemplará.
- Topografía:

- Global: para simular la ubicación de los mareógrafos, para generar mareogramas sintéticos a lo largo del litoral. Deben tener una amplia resolución.
- Local: para modelar la inundación producida por el tsunami.

(Martínez *et al.*, 2013)

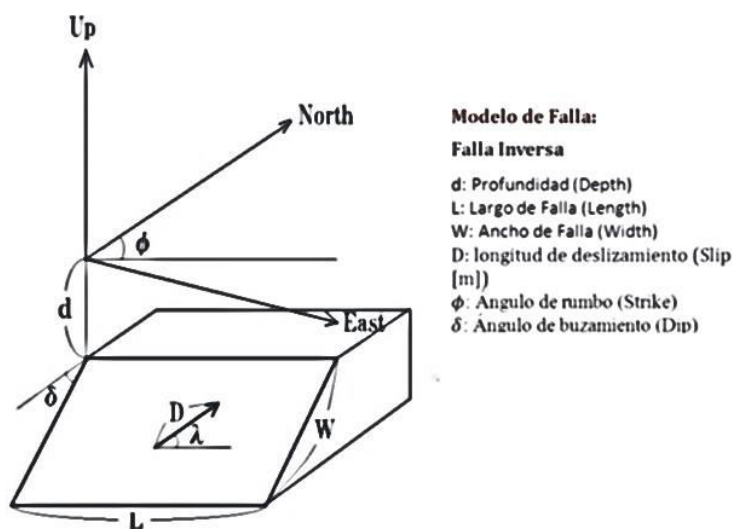
Se toman datos de topografía satelital de la misión “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM), con una resolución de 90 m., “Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer” (ASTER) con una resolución de 30 m y de las cartas nacionales del Perú a escala 1:100000, con curvas de nivel cada 25 m. Además, se realizó el levantamiento topográfico del cauce del río Rímac obteniendo curvas de nivel cada 1 m. Al correlacionar los datos batimétricos y topográficos se obtiene el modelo de elevación digital y se procede a elaborar las grillas anidadas (Martínez *et al.*, 2013).

Para alimentar el modelo numérico es necesario conocer los parámetros que definen una falla (Figura 10):

- Rumbo o azimut
- Dirección de buzamiento
- Ángulo de buzamiento
- Dislocación
- Área de ruptura
- Hipocentro del sismo

(Martínez *et al.*, 2013)

Figura 10 Parámetros de una falla



(Martínez *et al.*, 2013)

5. Comparación de los modelos de origen del terremoto del Tohoku 2011 usando simulaciones de tsunami y observaciones cercanas de campo. La catástrofe del terremoto y tsunami ocurrida en 2011 en Tohoku, Japón ha abierto múltiples entradas para la comprensión de la dinámica de los terremotos y los tsunamis. Hay diversas fuentes que proporcionan datos y documentación detallada como sismógrafos, receptores GPS, medidores de mareas oceánicas, sensores de presión inferior, entre otros que permiten que los estudios sobre el evento sísmico de Tohoku en 2011 continúen por años (Macinnes, Gusman, Leveque, Tanioka, & Macinnes, 2013).

Sin embargo, las futuras investigaciones que requieran simulación de tsunami se enfrentaran a la difícil tarea de elegir un terremoto fuente idóneo para recrear con mayor precisión las características del tsunami. La selección de modelos fuente inexactos es una de las principales fuentes de error en las simulaciones de inundación por tsunami. Para este estudio, se simuló la propagación e inundación a partir de distribuciones de deslizamientos del terremoto de Tohoku del 2011 obtenidas de estudios previos. Se emplearon ecuaciones no lineales de aguas poco profundas en el modelo de tsunami GeoClaw y se compararon las olas de tsunami (forma y altura) con los resultados simulados (Macinnes *et al.*, 2013).

Entre los métodos y herramientas que emplearon está el paquete de software GeoClaw; la deformación del suelo marino a partir de distribuciones seleccionadas de deslizamientos de terremotos; comparaciones de sus simulaciones con los registros de DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) así también comparaciones con los registros que se tomaron en la playa (Macinnes *et al.*, 2013).

El modelo GeoClaw es un paquete de software de código abierto, que fue aprobado por el NTHMP (United States National Tsunami Hazard Mitigation Program) para usarlo en proyectos de modelados de amenazas. Las ecuaciones bi-dimensionales de aguas someras se resolvieron usando un método de propagación de ola de volumen finito. Se utilizan celdas cartesianas en latitud-longitud, en las cuales la profundidad y el momentum promedio son aproximados y actualizados en cada paso. Este método conserva masa y momentum en regiones donde la batimetría es plana. La inundación la realizaron a través de la configuración de profundidad en cada celda, colocando 0 para el área de tierra seca, y positivo para las celdas del área húmeda, permitiendo así que el estado cambie a cada paso (Macinnes *et al.*, 2013).

6. Modelo GeoClaw. Muchos problemas de flujo geofísico o de propagación de olas toman lugar en dominios espaciales muy largos, para los cuales, un modelo detallado en 3D no es la opción más eficiente. Afortunadamente, las ecuaciones bidimensionales con profundidad promediada, como las ecuaciones de aguas someras, ofrece modelos que son lo suficientemente exactos para muchas aplicaciones. Incluso con modelos bidimensionales, a veces es necesario usar técnicas de malla de refinamiento

adaptativa (AMR) para enfocarse en ciertas regiones de la cuadrícula de acuerdo al área de interés y observar dichas regiones mientras el flujo evoluciona. Esta manera por lo general, es la única eficiente para obtener resultados con suficiente resolución espacial donde es requerida, como regiones a donde el flujo o la ola no han llegado o puntos distantes del área de estudio (M. J. Berger, George, Leveque, & Mandli, 2011).

GeoClaw es un software de investigación de código abierto que utiliza modelos de volumen finito de alta resolución junto con mallas de refinamiento adaptativas para atacar los problemas de flujo geofísico. Consiste en código fuente escrito en Fortran combinado con herramientas de Python. El código que emplea ha sido utilizado junto con ecuaciones de aguas someras para modelar tsunamis. Y, además, está escrito de forma que permita realizar extensiones para resolver otros problemas. Está basado en ClawPack (Conservation Laws Package) que es un paquete de software de código abierto que se ha desarrollado desde 1994 y es ampliamente utilizado para propósitos de enseñanza e investigación (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Está diseñado para resolver sistemas hiperbólicos de ecuaciones diferenciales parciales hasta en 3 dimensiones. Esta clase de ecuaciones diferenciales parciales por lo general, modelan propagación de olas, transporte de fluidos, y diversos problemas físicos que implican modelos matemáticos de forma hiperbólica (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Existen algunas dificultades que surgen al resolver ecuaciones de profundidad promediada sobre datos topográficos o batimétricos reales que requieren ciertas modificaciones sustanciales al enfoque que le da ClawPack. La variante del código de GeoClaw provee una implementación específica para estos problemas:

- Cuando el flujo toma lugar en partes donde la topografía o batimetría deben ser especificadas por múltiples sets de datos y hay regiones de traslape a diferentes resoluciones.
- Algunos problemas pueden ser atacados usando mallas cartesianas, pero muchas aplicaciones requieren utilizar mallas de longitud-latitud sobre la superficie de la tierra.
- El flujo es de alcance limitado; la profundidad llega a cero en los márgenes y la división entre húmedo-seco es un límite cambiante que debe ser tomado como parte del flujo. Esto se controla permitiendo que la profundidad del fluido sea cero (superficie seca) en algunas celdas de la malla. Estas celdas pueden cambiar dinámicamente entre húmedo y seco para modelar flujos de agua o inundación, y las mallas de refinamiento adaptativas se pueden emplear para devolver una resolución suficiente de la línea de la costa.
- Existen estados constantes no triviales (como un océano en calma) que se deben mantener igual. Y con frecuencia, la propagación de las olas es una perturbación de estos estados, como sucede con los tsunamis. Para los métodos de volúmenes finitos que conservan masa mediante

el uso de la profundidad como variable principal, esto requiere el empleo de métodos numéricos bien equilibrados.

(M. J. Berger *et al.*, 2011)

La base computacional de GeoClaw está escrita en Fortran, pero se proporciona una interfaz de usuario en Python para facilitar la configuración de una sola ejecución o de un grupo de ejecuciones que a menudo se requieren para hacer análisis de parámetros, estudios de sensibilidad o análisis probabilísticos de riesgos. Además, incluye herramientas de Python y Matlab para trazar la visualización de los resultados de diferentes formas (M. J. Berger *et al.*, 2011).

a. Modelos matemáticos de profundidad promediada. El conjunto más simple de ecuaciones de fluidos con profundidad promediada en 2 dimensiones espaciales laterales son las ecuaciones de aguas someras (M. J. Berger *et al.*, 2011).

$$\begin{aligned} h_t + (hu)_x + (hv)_y &= 0, \\ (hu)_t + \left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)_x + (huv)_y &= -ghB_x - Du, \\ (hv)_t + (huv)_x + \left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)_y &= -ghB_y - Dv \end{aligned} \quad (6)$$

Donde $u(x, y, t)$ y $v(x, y, t)$ son las velocidades de profundidad promediada en las dos direcciones horizontales, $B(x, y, t)$ es la topografía o batimetría, y $D = D(h, u, v)$ es el coeficiente de arrastre. Los términos de Coriolis también pueden agregarse a la ecuación de momentum. La ecuación (6) tiene la forma

$$q_t + f_1(q)_x + f_2(q)_y = \psi(q, x, y) \quad (7)$$

Donde $q = (h, hu, hv)$ es el vector consistente de la profundidad y momentum del fluido. Cuando hay ausencia de batimetría ($B \equiv \text{constante}$, entonces $B_x = B_y = 0$) y el arrastre ($D \equiv 0$), los términos fuente serían cero ($\psi \equiv 0$) y estas ecuaciones expresarían la conservación de masa y momentum horizontal. Aquí se emplean métodos de volumen finito conservadores que en general conservan masa, ya que no hay términos fuente en la ecuación de masa, y también conservarían momentum en ausencia de términos fuente. Esto es cierto incluso cuando se aplican mallas de refinamiento adaptativas, con excepción de las celdas que intersecan en la línea de la costa (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Nótese que, para un océano en calma, donde $h(x, t) + B(x, y) \equiv 0$ (nivel del mar) en todas las celdas húmedas, los términos fuente de la topografía cancelan exactamente los derivados de la presión

hidrostática. Y mantener este equilibrio numéricamente es crítico, lo que se detallará más adelante. El término de arrastre posee diversas formas, aquí se emplea

$$D = \frac{gM^2 \sqrt{(u^2 + v^2)}}{h^{\frac{5}{3}}} \quad (8)$$

Donde M es el coeficiente de Manning, asignándosele un valor de 0.025 (valores típicos basados empíricamente) (M. J. Berger *et al.*, 2011).

La mayoría de los tsunamis son generados por el movimiento del suelo marino durante un terremoto a un deslizamiento submarino, haciendo que una columna de agua se mueva. La longitud de la ola por lo general es muy larga comparada con la profundidad del océano, y bajo estas condiciones, las ecuaciones de aguas someras (6) son apropiadas (M. J. Berger *et al.*, 2011).

5) Ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión. Las ecuaciones de aguas someras, o de Saint-Venant en una dimensión son un conjunto de ecuaciones diferenciales que modelan los cambios de caudal y nivel de un líquido a lo largo del espacio unidimensional y el tiempo de manera no permanente como en un canal o superficie libre o abierta. En general, estos fenómenos se presentan en tres dimensiones, pero para la mayoría de aplicaciones prácticas es suficiente emplear una aproximación unidimensional en la dirección de mayor relevancia que usualmente es en dirección del flujo (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

El desarrollo de las ecuaciones requiere de las siguientes suposiciones para su uso:

- La profundidad y la velocidad de flujo solamente varía en la dirección longitudinal del canal.
- Las variaciones de profundidad y velocidad a lo largo del canal se realizan de manera gradual.
- El canal es aproximadamente lineal.
- La pendiente es pequeña.
- El lecho es fijo, o sea, no hay erosión ni acreción.
- La resistencia puede ser calculada a partir de los modelos de flujo uniforme permanente.
- El fluido es incomprensible y de densidad constante.

(Chow *et al.*, 1994)

Este sistema de ecuaciones está compuesto por dos conjuntos de ecuaciones: las ecuaciones de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento o momentum (Chow *et al.*, 1994).

La ecuación de continuidad tiene en cuenta un balance de masa sobre un volumen de control. En forma conservativa puede escribirse en términos de caudal Q y del área A de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

O de manera no conservativa, en términos de la velocidad media longitudinal V y la profundidad p así:

$$V \frac{\partial p}{\partial x} + p \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

La ecuación de momentum surge al igualar las fuerzas externas aplicadas al volumen de control como la gravedad, la presión, la fricción, el viento entre otras. Esta ecuación en forma conservativa puede escribirse en términos del caudal Q , el área A , la profundidad p , pendiente del canal S_0 , pendiente de fricción S_f y de la gravedad g de la siguiente manera:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial p}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (11)$$

O de manera no conservativa en términos de la velocidad media longitudinal V así:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial p}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (12)$$

Debido a que en varios contextos la solución de las ecuaciones de Saint-Venant presenta dificultades para encontrar una respuesta satisfactoria o que en ocasiones no es necesario utilizar todos los términos de las ecuaciones, existen tres simplificaciones básicas conocidas como “onda dinámica”, “onda difusiva” y “onda cinemática”, que se diferencia entre sí de acuerdo con los términos de la ecuación de momentum (de forma conservativa) que toman en cuenta (Chow *et al.*, 1994).

- Onda dinámica: emplea todos los términos de la ecuación de momentum

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial p}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (13)$$

- Onda difusiva: emplea solamente los términos de fuerza de presión, fuerza gravitacional, y el de fuerza de fricción.

$$g \frac{\partial p}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (14)$$

- Onda cinemática: emplea solamente los términos de fuerza gravitacional y de fuerza de fricción.

$$-g(S_0 - S_f) = 0 \quad (15)$$

(Chow *et al.*, 1994)

En principio, la aproximación de la onda dinámica sería el mejor modelo ya que utiliza todos los términos de la ecuación diferencial de momentum. Sin embargo, en la práctica esto no siempre es cierto pues se ha descubierto que en algunos casos las ondas dinámicas se disipan rápidamente dejando las ondas cinemáticas, que viajan a menor velocidad. También se ha encontrado que para ondas de inundación el comportamiento de la atenuación de la onda en condiciones reales es más semejante al caso de la onda cinemática que al de onda dinámica, ya que la atenuación es nula o muy baja como se espera de la solución de la aproximación de la onda cinemática, y no de la onda dinámica (Ponce, 2013).

b. Métodos numéricos. El modelado numérico de propagación de tsunamis transoceánicos junto con el modelado de inundaciones a pequeña escala en regiones costeras implica varios retos algorítmicos. Las ecuaciones de aguas someras de profundidad promediada son utilizadas para reducir esto a un problema dependiente del tiempo en espacios de dos dimensiones, pero también es crucial usar una malla de refinamiento adaptativa para hacer eficiente el manejo de las enormes diferencias en escalas espaciales. Esto debe realizarse de forma equilibrada que capture precisamente las pequeñas perturbaciones en un estado constante del océano en calma. Las inundaciones se modelan de forma que las celdas cambien dinámicamente de seco a húmedo (Leveque, George, & Berger, 2011).

Como ya se mencionó, GeoClaw está basado en ClawPack, el cual provee una implementación general de algoritmos de propagación de olas, que son una clase de métodos de volumen finito de alta resolución en la cuales, cada celda de la malla es vista como un volumen sobre el cual se calculan el promedio de la solución de la variable q . Lógicamente, emplea mallas rectangulares y Q_{ij}^n representa el promedio de la celda, en la celda (i, j) en el tiempo t_n . En cada iteración de tiempo, la celda se promedia y se actualiza por la propagación de la ola dentro de la malla. Estos son los métodos de tipo Godunov en los que las olas se calculan resolviendo un “problema de Riemann” en el borde de cada celda (M. J. Berger *et al.*, 2011).

El problema de Riemann es un problema de valores iniciales, usando las ecuaciones de aguas someras junto con los datos constantes determinados por las celdas promediadas de las variables dependientes y la topografía en cada lado de la interfaz. La ventaja de los métodos de tipo Godunov es que proporcionan un enfoque sólido a la solución de problemas con soluciones discontinuas, como olas de choque que generalmente surgen en la solución a ecuaciones no lineales hiperbólicas. En las ecuaciones de aguas someras, los choques son “agujeros”. El problema de Riemann definido en cada celda permite olas de

choque en cada solución de Riemann, y utiliza “solucionadores aproximados de Riemann” que producen rápidamente soluciones robustas que sirven de base para el método numérico (M. J. Berger *et al.*, 2011).

GeoClaw emplea una variante de la formulación f-wave (Leveque *et al.*, 2011) que permite que los términos fuente de la topografía sean incorporados en el problema de Riemann. La formulación f-wave de los algoritmos de propagación de olas fue presentado originalmente para las ecuaciones de aguas someras (Bale, Leveque, Mitran, Rossmannith, & Sci, 2002). En este enfoque, es la diferencia en el flujo normal de la interfaz de la celda que se divide en la propagación de olas, pero solo después de la modificación de los componentes del momentum de la diferencia de flujo por los términos fuente de la topografía. Esto se hace de manera que los métodos estén equilibrados cuando el océano está en calma: si los datos iniciales están en equilibrio con velocidad cero y una superficie plana ($h + B = \text{constante}$) entonces la diferencia de flujo modificada es el vector cero, lo que lleva a cero la fuerza de las f-waves y no hay cambio en la solución (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Las f-waves modifican los promedios de las celdas en cada lado de la interfaz, además se emplea un problema transversal de Riemann donde las olas que se mueven hacia la celda se dividen en dirección transversal y modifican el promedio de las celdas en las filas adyacentes de la malla. Esto mejora la estabilidad y exactitud del método. En GeoClaw se incorporan también solucionadores de estado seco ya que se modela la frontera de la costa en movimiento como un flujo implícito entre las celdas secas y húmedas. Esto significa que la línea de la costa está representada por un patrón de escalera en la malla cartesiana. Los términos fuente de la topografía (B_x y B_y del lado derecho de la ecuación (6)) se incorporan en el solucionados de Riemann para obtener un método equilibrado y para poder manejar el problema de los estados secos (M. J. Berger *et al.*, 2011).

En general, ClawPack permite la solución de problemas hiperbólicos en cualquier malla rectangular, con una función de mapeo arbitraria específica que mapea puntos en el espacio computacional al dominio físico. En espacios de dos dimensiones, siempre se asume que las celdas son cuadradas con bordes lineales que se unen a los vértices obtenidos luego de aplicar la función de mapeo a la malla rectangular de vértices en el dominio computacional (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Los algoritmos de propagación de olas con solucionadores transversales de Riemann trabajan de forma robusta. Los problemas de Riemann siempre se resuelven a partir del conjunto original de ecuaciones en la dirección ortogonal a cada borde de la celda. El largo de los bordes y el área de la celda vienen en las fórmulas para actualizar los promedios de las celdas. La propagación transversal de la ola también toma en cuenta el hecho de que los bordes de las celdas adyacentes no son necesariamente ortogonales uno a otro. Para la propagación en tierra, se usan distancias y áreas medidas en una esfera con coordenadas de longitud-latitud o dominios puramente cartesianos. Las coordenadas de latitud-longitud son ideales para

modelar tsunamis en la tierra, donde el dominio de interés está acotado lejos de los polos (M. J. Berger *et al.*, 2011).

c. Mallas de refinamiento adaptativas (AMR). Las iteraciones en los ajustes refinados se realizan de tal forma que la estabilidad del método de volumen finito se mantenga. Esto por lo general requiere refinar en cada iteración por el mismo factor, tanto en tiempo como en espacio. En cada iteración es necesario rellenar con valores en las “celdas fantasmas” alrededor de los bordes de cada nivel a fin de dar condiciones fronteras para cada iteración. Para cada celda fantasma, el valor se toma de una malla vecina, si existe, o se obtiene de una interpolación espacio-tiempo de los valores en la malla subyacente, que ya se ha actualizado en el tiempo. Este procedimiento se usa recursivamente en todos los niveles: después de cada iteración en el nivel de n mallas, el número requerido de iteraciones será aplicado para todos los niveles de $n+1$ mallas y así sucesivamente (M. J. Berger *et al.*, 2011).

La aplicación de modelación de tsunamis añade otra característica al código: la capacidad de especificar refinamiento anisotrópico en el tiempo, en donde la iteración de un nivel al siguiente puede ser refinada por un factor diferente al factor espacial. Esto es crucial para problemas donde mallas muy finas se usan solo cerca de la costa de un océano, ya que, en las ecuaciones de aguas someras, la velocidad de la ola viene dada por la ecuación (4). Por lo tanto, el factor de refinamiento en el tiempo puede ser más pequeño que el factor de refinamiento espacial en ese nivel. Dado que la mayor parte de cálculo computacional es en las redes más finas, esto puede hacer una gran diferencia en cuanto a tiempo de ejecución (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Las mallas se refinan marcando las celdas donde la resolución es suficiente, y luego estas celdas marcadas se agrupan en ajustes de refinamiento. Para marcarlas se usa un error de estimación, o examinando gradientes de la solución, o simplemente marcando aquellas celdas donde la elevación de la superficie es perturbada a partir del nivel del más hasta un nivel específico. Empleando heurísticas para el reconocimiento de patrones, estas celdas marcadas son agrupadas en mallas de ajuste que son eficientes, en el sentido de que estas no contienen muchas celdas sin marcar, además, no introduce muchos grupos de ajuste separados. Además, es posible especificar regiones rectangulares que requieren cierto nivel de resolución. Esto para asegurar que ciertas porciones de la costa siempre se refinan a una resolución de metros, mientras que, para las profundidades del océano, se refinan a una malla con muchos kilómetros de ancho (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Todas estas rutinas son parte de GeoClaw, donde es posible especificar tolerancias y especificar un máximo y mínimo de niveles de refinamiento. Independiente del método que se emplee para el criterio de refinamiento, el resultado es un conjunto de celdas marcadas que necesitan ser cubiertas por mallas más finas (M. J. Berger *et al.*, 2011).

6) Algoritmo de estrategia de integración de AMR. El algoritmo básico de integración de AMR aplica los siguientes pasos de manera recursiva, a partir de la malla más gruesa, con un nivel $l = 1$:

1. Tomar una cantidad de iteraciones de longitud Δt^l en todas las mallas en el nivel l
2. Usando la solución al inicio y al final de esta iteración, realizar una interpolación espacio-tiempo para determinar los valores de las celdas fantasma para todas las mallas en el nivel $l + 1$ en el tiempo inicial y todos los tiempos intermedios $r_t^l - 1$, para cualquier celda fantasma que no esté en las mallas del nivel adyacente $l + 1$ (donde haya una malla adyacente en el mismo nivel, los valores se copian directamente en las celdas fantasma en cada iteración inmediata).
3. Tomar r_t^l iteración en todas las mallas de los niveles $l + 1$ para llevar esas mallas al mismo tiempo avanzado como las mallas que están en el nivel l .
4. Para cualquier celda en el nivel l que sea cubierta por una malla del nivel $l + 1$, reemplazar la solución Q en esa celda por un promedio apropiado de los valores de las $r_x^l r_y^l$ celdas en la malla más fina que cubre esta celda.
5. Ajustar el grosor del valor de las celdas adyacentes a las mallas finas para mantener la conservación de masa (y de momentum en regiones donde los términos fuente desaparecen)

Después de cada iteración en nivel $l + 1$ en el paso 3, el mismo algoritmo se aplica recursivamente para avanzar incluso a las mallas más finas ($l + 2, \dots$) (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Cada cierta cantidad de iteraciones en cada nivel, se aplica un Paso de Remallado (excepto en los niveles más finos permitidos). La frecuencia depende de qué tan rápido las olas se estén moviendo y qué tan ancha sea la región de memoria alrededor de las celdas de ajuste. Cuanto mayor es la región de memoria intermedia, menos necesidad de ser remallada tiene. Por otro lado, una amplia región de memoria resulta en más celdas que integrar en el nivel más fino. Típicamente se utiliza una memoria de 2 o 3 celdas por iteración en cada nivel (M. J. Berger *et al.*, 2011).

7) Algoritmo de remallado de AMR.

1. Marcar las celdas en el nivel l que necesiten ser refinadas en el nivel $l + 1$.
2. Agrupar las celdas marcadas en grupos rectangulares, usando el algoritmo de Berger y Rigoutsos (M. Berger & Rigoutsos, 1991). Esta heurística trata de encontrar un balance entre la minimización del número de celdas a ajustar y minimizar el número de celdas innecesariamente refinadas cuando se agrupan en rectángulos.
3. Inicializar la solución en cada malla del nivel $l + 1$. Para cada celda:
 - a. Copiar los datos de una malla existente del nivel $l + 1$ o

- b. Si no existe malla en ese punto, interpolar desde las mallas del nivel l .

(M. J. Berger *et al.*, 2011)

d. Conjunto de datos topográficos. Para utilizar GeoClaw el usuario debe proveer ciertos archivos que especifiquen la topografía y batimetría del terreno en el cual evolucionará el flujo. Cada conjunto de datos topográfico especifica la coordenada z relativa al nivel del mar, como un conjunto de puntos en una malla rectangular. Se permiten 3 diferentes formatos. Existen diversas fuentes en línea que proporcionan datos topográficos de varias regiones del mundo (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Algunas aplicaciones requieren un conjunto de datos que describan el movimiento de la topografía relativa a una topografía inicial, por ejemplo, si el movimiento del suelo marino resultante de un terremoto o deslizamiento marino es usado para generar una modelación de tsunamis. En este caso se debe proveer uno o más archivos que especifiquen el desplazamiento relativo en cierto momento (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Por lo general se requiere más de un archivo que describa la topografía a diferentes resoluciones. Para una simulación de tsunami se puede modelar una extensa región del océano, de la cual se puede obtener los datos de diversas fuentes confiables en línea. Sin embargo, no es suficiente para modelar la inundación en regiones específicas a lo largo de la costa por lo que estos datos deben ser complementados con archivos topográficos con alta resolución en regiones pequeñas (M. J. Berger *et al.*, 2011).

Ya que se pueden proveer múltiples archivos topográficos para una sola ejecución, en una celda en el espacio la topografía será determinada a partir del conjunto de datos, cubriendo este punto en su resolución más fina, así también se promediará la profundidad y la topografía de esa celda (M. J. Berger *et al.*, 2011).

C. HERRAMIENTAS DE SOFTWARE

1. QGIS. Es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto. QGIS actualmente funcional en la mayoría de plataformas, GNU/Linux, Unix, Mac OS y Microsoft Windows. Permite manejar formatos ráster y vectoriales a través de las bibliotecas GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) y OGR, así como bases de datos (Athanasios *et al.*, 2016).

QGIS ofrece muchas funcionalidades SIG comunes, proporcionadas por las características principales y complementos descritos a continuación:

- Visualización de datos: se pueden ver y sobreponer datos vectoriales y ráster en diferentes formatos y proyecciones sin convertir a un formato interno o común. Los formatos admitidos incluyen:

- Tablas y vistas habilitadas para operaciones espaciales utilización PostGIS, SpatiaLite u MS SQL Spatial, Oracle Spatial, formatos vectoriales admitidos por la biblioteca OGR instalada, incluyendo archivos shape de ESRI, MapInfo, SDTS, GML y muchos más.
 - Ráster y formatos de imágenes admitidos por la biblioteca GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) instalada, por ejemplo, GeoTIFF, ERDAS IMG, ArcInfo ASCII GRID, JPEG, PNG y muchos más.
 - Ráster GRASS y datos vectoriales de base de datos GRASS (location/mapset).
 - Datos espaciales en línea proporcionados como servicios web OGC incluyendo WMS, WMTS, WCS, WFS y WFS-T.
- (Athán *et al.*, 2016)
- Explorar datos y componer mapas: se puede componer mapas y explorar datos espaciales interactivamente con una GUI amigable. Las herramientas más útiles disponibles en la GUI incluyen:
 - Navegador QGIS.
 - Reproyección al vuelo.
 - Gestor de Base de Datos.
 - Diseñador de mapas.
 - Panel de vista general.
 - Marcadores espaciales.
 - Herramientas de anotaciones.
 - Identificar/seleccionar objetos espaciales.
 - Editar/ver/buscar atributos.
 - Etiquetado de elementos definidos por los datos.
 - Vectores definidos por datos y herramientas para simbología ráster.
 - Composición del atlas y mapa con capas de cuadrícula.
 - Flecha y barra de escala y etiqueta de derechos de autor para mapas.
 - Apoyo para guardar y restaurar proyectos.

(Athán *et al.*, 2016)
 - Crear, editar, gestionar y exportar datos: es posible crear, editar, administrar y exportar capas vectoriales y ráster en varios formatos. QGIS ofrece lo siguiente:
 - Herramientas de digitalización para formatos reconocidos OGR y capas vectoriales GRASS.
 - Capacidad para crear y editar archivos shape y capas vectoriales GRASS.
 - Complementos de georreferenciado para geocodificar imágenes.
 - Herramienta GSP para importar y exportar formato GPX y convertir otros formatos GPS a GPX o descargar o subir directo a la unidad GPS.

- Apoyo para visualizar y editar datos de OpenStreetMap.
- Capacidad para crear tablas de base de datos espaciales desde archivos shape con el complemento de Administrador de Bases de Datos.
- Mejor manejo de tablas de bases de datos espaciales.
- Herramientas para la gestión de tablas de atributos vectoriales.
- Opción para guardar capturas de pantalla como imágenes georreferenciadas.
- Herramienta para exportar DXF con capacidades aumentadas de explorar estilos y plugins que realizan funciones parecidas a CAD.

(Athán *et al.*, 2016)

- Análisis de datos: puede realizar análisis de datos espaciales en bases de datos espaciales y otros formatos apoyados por OGR. Actualmente QGIS ofrece análisis de vectores, muestras, geoprocetamiento, geometría y herramientas de manejo de bases de datos. También se pueden usar las herramientas de GRASS integradas, que incluyen la funcionalidad completa de GRASS y más de 400 módulos. O trabajar con el complemento de Procesado, que proporciona un marco de análisis geoespacial nativo y algoritmos de un tercero de QGIS como GDAL, SAGA, GRASS, etc. (Athán *et al.*, 2016)
- Publicación de mapas en internet: QGIS se puede utilizar como un cliente WMS, WMTS, WMS-C o WFS y WFS-T, y como servidor WMS, WCS o WFS. Además, se pueden publicar los datos en internet utilizando un servidor web con UMN MapServer o GeoServer instalado (Athán *et al.*, 2016).
- Extender funcionalidades QGIS a través de complementos: QGIS se puede adaptar a necesidades especiales con la arquitectura de complemento extensible y bibliotecas que se pueden utilizar para crear complementos. Se puede incluso crear nuevas aplicaciones con C++ o Python (Athán *et al.*, 2016).

Es un software libre y opera bajo la licencia GNU GPL. Puede ser modificado libremente de tal manera que pueda realizar diferentes funcionalidades más especializadas. Ya existe QGIS Browser y QGIS Server, ambos productos poseen diferentes interfaces de usuario (Athán *et al.*, 2016).

2. **OpenLayers 2.** Es una librería Javascript para componer mapas dinámicos en páginas web. Forma parte de los proyectos de la Open Source Geospatial Foundation, es de uso libre bajo licencia BSD. Proporciona una API que permite la creación de clientes web para acceder y manipular información geográfica procedente de fuentes muy variadas. Este plugin para QGIS es una de las opciones más útiles y sencillas para obtener datos de alta calidad, los cuales son fundamentales para cualquier tarea que se realice en un SIG (Morales, 2015).

Las aplicaciones de mapas contienen capas de mapa (ráster o vectoriales, procedentes de una gran variedad de fuentes), y los controles para operar sobre esas capas. OpenLayers 2 permite integrar los mapas con otras librerías de HTML5 y personalizar su estilo empleando librerías de CSS (Morales, 2015).

Entre las funcionalidades que permite OpenLayers 2 se menciona:

- Interactuar con servicios GIS externos: Google Maps, Bing Maps, Yahoo Maps, OpenStreetMap a través de QGIS Server, ArcGIS Server, GeoServer, MapServer.
- Crear mapas interactivos.
- Visualizar información espacial/geográfica.
- Incluir y superponer distintos tipos de capas.
- Editar información espacial.

(Morales, 2015)

Algunas de las ventajas de OpenLayers son:

- Superposición de múltiples capas de mapa en una sola aplicación.
- Muestra tiles/imágenes de WMS (Web Map Service), WMTS (Web Map Tile Service), TMS (Tile Map Service), WMS-C (Web Mapping Service-Cached).
- Representación de elementos vectoriales y estilo con soporte para KML, GeoJSON, WKT, GML, WFS Y GeoRSS.
- Edición basada en la web, incluyendo snapping y splitting, a través de WFS-Transaccional (WFS-T) aprovechando SVG o VML.
- Conectable con cualquier kit de herramientas Javascript (jQuery, Ext, Dojo, MooTools).
- Elementos de clúster y paginación.

(Morales, 2015)

Sin embargo, OpenLayers carece de una rica interfaz de usuario. Para solucionar esto se cuenta con Ext JS, una librería Javascript que ofrece un conjunto de componentes para incluir dentro de una aplicación web, pero falla en los mapas, por ello se poya en otro framework llamado GeoExt 2, y así servir como complemento para OpenLayers 2 (Morales, 2015).

OpenLayers3 Muestra los datos geospaciales en cualquier navegador web de escritorio o móvil. Al igual que OpenLayers 2, es compatible con una gran variedad de tipos de datos y capas. Pero a diferencia de la versión anterior esta se construye desde cero basándose en las últimas tecnologías de navegación como HTML5, WebGL y CSS3 (Morales, 2017).

3. **GeoExt.** Es un conjunto de herramientas basadas en Javascript para crear aplicaciones web mapping. Combina la funcionalidad SIG de OpenLayers con la interfaz de usuario de la librería Ext JS. Es una librería de código abierto que permite crear aplicaciones GIS similares a las de escritorio, pero en la web (Morales, 2016b).

GeoExt 2.x es el complemento de OpenLayers 2 para construir aplicaciones webmapping. La versión 3 de GeoExt es la sucesora de la serie GeoExt 2.x y está construido sobre las nuevas librerías OpenLayers 3 y Ext JS 6 (Morales, 2016b).

OpenLayers 3 supuso una reescritura completa de la librería webmapping, con un nuevo diseño del código de la API, por lo que la versión 2.x de GeoExt no es compatible con OpenLayers 3 (Morales, 2016b).

4. **Qgis2web.** Es una herramienta que exporta los proyectos de QGIS en mapas web de OpenLayers 3 o Leaflet. Este plugin está basado en qgisleaf y qgis-ol3. Ambos plugins se han fusionado en qgis2web (Morales, 2016a).

Qgis2web crear un mapa web basado en OpenLayers 3 o Leaflet de todas las capas vectoriales que existan en un proyecto de QGIS. La herramienta convierte las capas vectoriales en GeoJSON y crea una estructura de carpetas con un archivo index.html que contiene el mapa web. Además, el plugin es capaz de exportar la simbología definida en QGIS tanto de puntos, líneas y polígonos e incluir un control de visibilidad de capas y varios controles más (Morales, 2016a).

Los siguientes ajustes están disponibles para configurar cómo se crea el mapa web:

- **Data Export:** estos parámetros controlan cómo se crean los archivos GeoJSON a partir de las capas vectoriales QGIS. Para reducir el tamaño de las capas resultados se debe activar la opción *Minify GeoJSON files*.
- **Scale Zoom:** Controla la extensión del mapa, el nivel de zoom máximo y mínimo, etc.
- **Appearance:** la apariencia del mapa web. Incluye opciones como incluir controles, búsqueda de direcciones, lista de capas, herramientas de medición, barra de escala, geolocalización, resaltado de objetos, resaltado de objetos geográficos, etc.

(Morales, 2016a)

Aunque existen algunas limitaciones, ya que QGIS, OpenLayers 3 y Leaflet utilizan diferentes tecnologías web mapping. Esto significa que sus respectivas funcionalidades difieren. Qgis2web hace todo lo posible para interpretar un proyecto de QGIS y exportar el HTML, Javascript y CSS para crear un mapa

web de tal forma que el resultado final sea lo más fiel posible al proyecto original de QGIS (Morales, 2016a).

Sin embargo, puede ser que algunos elementos de un proyecto de QGIS no sean reproducidos. En el caso de pérdida de funcionalidades, es posible editar manualmente el código para lograr lo que qgis2web no consiga. Algunas de las limitaciones son:

- No es posible exportar un estilo basado en reglas
- Los marcadores de puntos SVG a veces no aparecen en el panel de vista previa, pero funcionan cuando el mapa se exporta.
- La búsqueda de direcciones en los mapas de OpenLayers 3 no aparece en el panel de vista previa, pero funciona cuando el mapa se exporta.
- En los mapas de OpenLayers 3 solo se representa un estilo de puntos sencillo, no los clasificados o graduados.
- Los raster se exportan sin estilo.
- El estilo de línea no aparece en la vista previa de OpenLayers 3, pero funciona cuando el mapa se exporta.
- Leaflet no puede etiquetar capas de líneas o polígonos, solo puntos.
(Chadwin, 2016)

5. **Google Maps API.** Los servicios web de Google Maps son un conjunto de interfaces HTTP para los servicios de Google que proporcionan datos geográficos para desarrollar aplicaciones de mapas. Las API de Google Maps están disponibles para Android, iOS, navegadores web y a través de servicios web HTTP (Google, 2017c).

La Google Maps API proporciona estos servicios web desde una interfaz para solicitar datos de Maps API a servidores externos y usarlos dentro de las aplicaciones que utilicen Maps. Estos servicios están diseñados para usarse junto con un mapa. Los servicios web emplean solicitudes HTTP para direcciones URL específicas y les pasan a los servicios parámetros de direcciones URL como argumentos. Generalmente, los servicios devuelven datos en la solicitud HTTP como JSON o XML para que las aplicaciones los procesen o analice (Google, 2017c).

Una solicitud de servicio web típica por lo general tiene la siguiente forma:

`https://maps.googleapis.com/maps/api/service/output?parameters`

donde *service* indica el servicio específico solicitado y *output* indica el formato de la respuesta (por lo general es json o xml).

Los servicios que ofrece Google Maps son:

- Google Maps Directions API

- Google Maps Distance Matrix API
- Google Maps Elevation API
- Google Maps Geocoding API
- Google Maps Geolocation API
- Google Maps Roads API
- Google Maps Time Zone API
- Google Places API Web Service

(Google, 2017c)

Google Maps Elevation API permite realizar consultas acerca de ubicaciones sobre la superficie terrestre y obtener datos de elevación. Proporciona datos de elevación para todas las ubicaciones sobre la superficie terrestre, incluidas ubicaciones profundas en el lecho marino (devolviendo valores negativos). Existen casos en los cuales Google no cuenta con mediciones de elevación exactas para la ubicación precisa de la solicitud, por lo que el servicio realizará una interpolación y devolverá un valor promediado recurriendo a las cuatro ubicaciones más cercanas (Google, 2017a).

Se puede acceder a Google Maps Elevation API a través de una interfaz HTTP. Al utilizar el Google Maps JavaScript API también se puede acceder a esta API directamente usando el objeto `ElevationService()` (Google, 2017a).

Los datos de ubicación se deben especificar de alguna de las dos maneras siguientes:

- Como un conjunto de una o más *locations*.
- Como una serie de puntos conectados a lo largo de un *path*.

Cualquiera de estos enfoques usa coordenadas de latitud/longitud para identificar las ubicaciones o los vértices del trayecto. La Google Maps Elevation API devuelve datos para consultas individuales con la mayor precisión posible. Las consultas en lote que incluyan múltiples ubicaciones pueden devolver datos menos precisos, especialmente si las ubicaciones están distanciadas entre sí, ya que puede ocurrir cierta unificación de los datos (Google, 2017a). Una dirección URL de Google Maps Elevation API debe respetar el siguiente formato:

`https://maps.googleapis.com/maps/api/elevation/outputFormat?parameters`

Los formatos de salida se especifican usando el indicador del servicio de seguimiento en la dirección URL de la solicitud. Google Maps Elevation API actualmente admite los siguientes formatos de salida:

- `/json` devuelve resultados en JavaScript Object Notation (JSON)
- `/xml` devuelve resultados en XML, agrupados en un nodo `<ElevationResponse>`

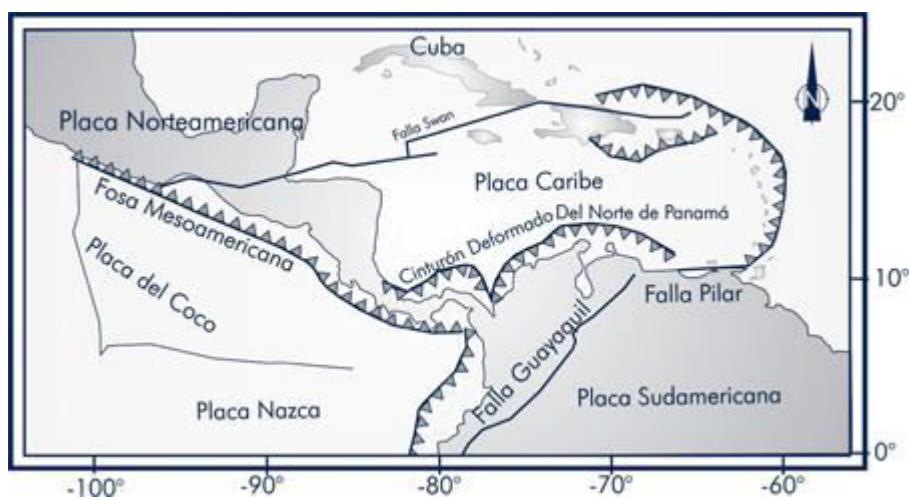
(Google, 2017a)

D. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

Un catálogo de tsunamis para Centro América contiene 49 tsunamis en el período de 1539-1996, treinta y siete de estos ocurrieron en el Pacífico y doce en el Caribe. El número de tsunamis conocidos incrementó dramáticamente después de la mitad del siglo XIX, que 43 de estos eventos ocurrieron entre 1850 y 1996. Esto es probablemente una consecuencia de la falta de población viviendo cerca de las costas en épocas anteriores (Fernandez *et al.*, 2000).

La regionalización preliminar de las fuentes de terremotos asociados a tsunamis reportados muestra que, en el Pacífico, la mayoría de los eventos fueron generados por la Zona de Subducción Cocos-Caribe (CO-CA). En el lado del Caribe, 5 eventos están relacionados con el Límite de Placas Norteamérica-Caribe (NA-CA) y 7 con el Cinturón Deformado del Norte de Panamá (Fernandez *et al.*, 2000).

Figura 11 Configuración tectónica de Centro América



(ONU, 2008)

Hay 10 tsunamis locales con un informe de daños específico, 7 en el Pacífico y el resto en el Caribe. El número total de víctimas debido a tsunamis locales es menos de 455 pero este número podría ser mayor. Los daños y perjuicios reportados van desde daños costeros y daños a barcos hasta la destrucción de pequeñas poblaciones, y no existe una cuantificación de los mismos (Fernandez *et al.*, 2000).

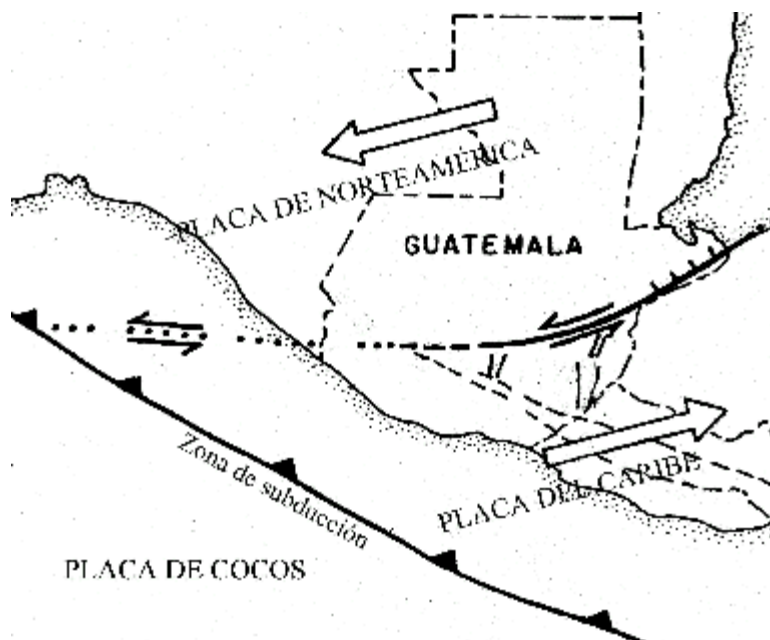
Una estimación empírica preliminar del riesgo de tsunami indica que el 43% de los terremotos fuertes, con magnitud superior a 7.0 ($M_s > 7.0$), a lo largo de la costa del Pacífico de Centroamérica y 100% a lo largo del Caribe, generan tsunamis. En el Pacífico, la costa de Guatemala a Nicaragua tiene el 32% de probabilidad de generar tsunamis después de un terremoto fuerte, mientras la probabilidad para la costa de Costa Rica a Panamá es de 67%. 60 centros de población en la costa del Pacífico y 44 en el Caribe están expuestos al impacto de los tsunamis. Esta estimación también sugiere que las áreas con mayor potencia de

tsunami en el Pacífico son las costas de Nicaragua a Guatemala y la parte central de Costa Rica; del lado del Caribe, la zona del Golfo de Honduras y las costas de Panamá y Costa Rica están en peligro. Los terremotos con $M_s > 7.0$ con epicentros en alta mar o en tierra cerca de la costa podrían desencadenar tsunamis que afectarían esas zonas (Fernandez *et al.*, 2000).

1. Marco tectónico para Guatemala. El territorio nacional se encuentra repartido en tres placas tectónicas: norteamericana, Caribe y Cocos. Los movimientos relativos entre estas determinan los principales rasgos topográficos del país y la distribución de los terremotos y volcanes (INSIVUMEH, 2005).

El contacto entre las placas de Norteamérica y Caribe es de tipo transcurrente. Su manifestación en la superficie son las fallas de Chixoy-Polochic y Motagua. El contacto entre las placas de Cocos y del Caribe es de tipo convergente, en el cual, la placa de Cocos se mete debajo de la placa del Caribe, a lo que se le conoce como zona de subducción. Este proceso da origen a una gran cantidad de temblores y formación de volcanes. El contacto entre estas dos placas está aproximadamente a 50 km. frente a las costas del Océano Pacífico. A su vez, estos dos procesos generan deformaciones al interior de la placa del Caribe, produciendo fallas secundarias como se observa en la Figura 12 (INSIVUMEH, 2005).

Figura 12 Configuración tectónica para Guatemala

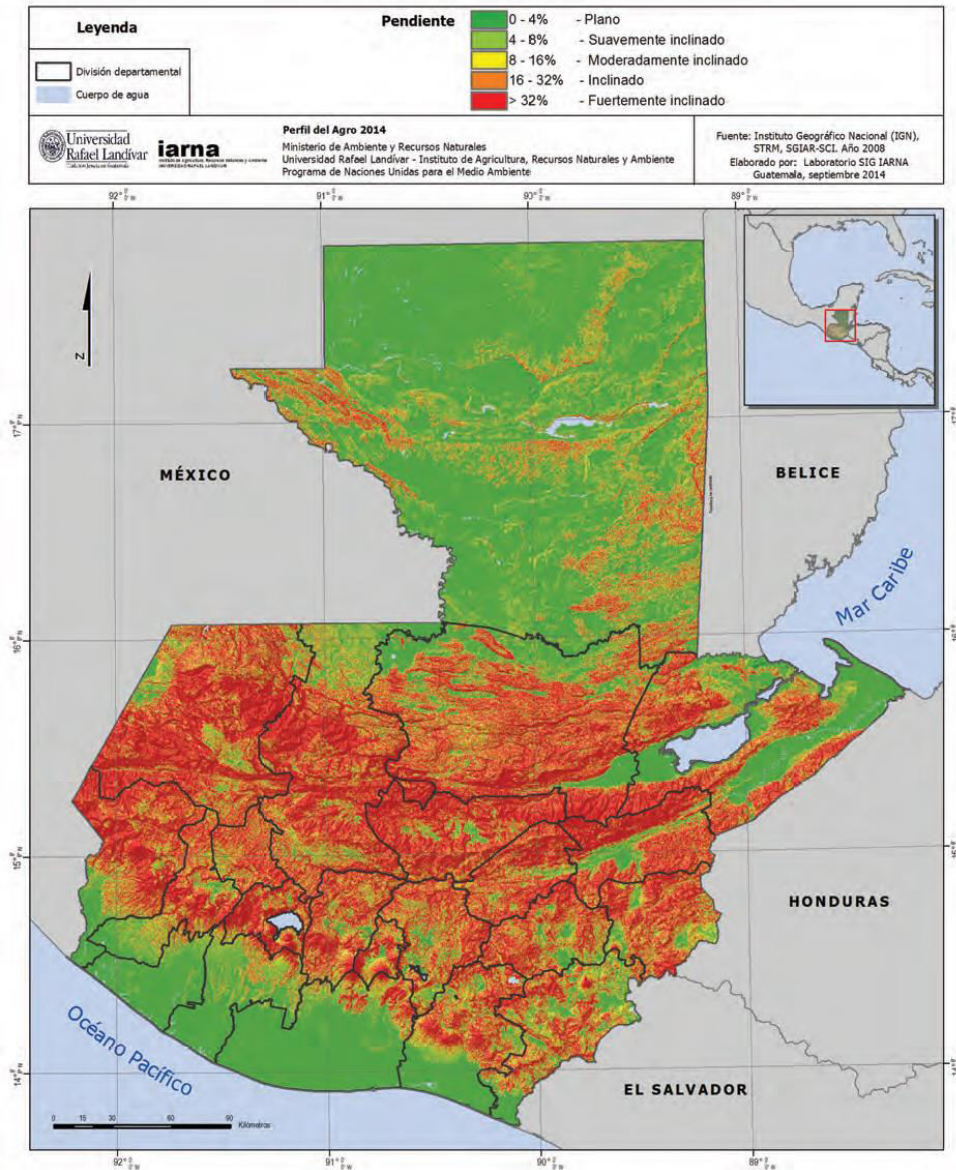


(INSIVUMEH, 2005)

2. Topografía. Una de las partes más importantes para el estudio de los efectos que tendría un tsunami en la costa sur del país es la topografía de la región, como se observa en la Figura 13. A pesar de

que Guatemala cuenta con territorio dominado por dos sistemas montañosos y una cadena volcánica, el 49% del territorio nacional es de pendiente Plana (0 – 4%), principalmente en la Costa Sur, Costa Atlántica y el Centro-Norte. Las categorías Inclinado y Fuertemente Inclinado abarcan un 35% de la superficie nacional, ocupando el territorio montañoso y volcánico antes mencionado. La distribución de pendientes para Guatemala se muestra en la Figura 13 (Tamasiunas *et al.*, 2005).

Figura 13 Mapa de pendientes de Guatemala



(Tamasiunas *et al.*, 2005)

El departamento de San Marcos posee una variedad de climas debido a su topografía. En la costa sur, el terreno es plano, como en el municipio de Ocos a 3 msnm; en el altiplano, por la altura el clima es frío,

como en el municipio de Ixchiguán a 3200 msnm (SEGEPLAN, 2010). En la Figura 14 se muestra la cuantificación de las pendientes para San Marcos.

La topografía del departamento de Retalhuleu es bastante quebrada, pero sus alturas varían entre los 614 msnm, descendiendo paulatinamente hasta los 5 msnm en Champerico a la orilla del mar, por lo que su clima en general es más cálido que templado. Además, sus tierras son cultivables dada la topografía plana ondulada o suavemente inclinada (SEGEPLAN, 2010). En la Figura 15 se muestra la cuantificación de las pendientes para Retalhuleu.

En el departamento de Suchitepéquez, la mayor parte de la pendiente es del 4%, lo que lo hace relativamente plano y cuenta con la topografía clásica de los departamentos que colindan con el Océano Pacífico (SEGEPLAN, 2010). En la Figura 16 se muestra la cuantificación de las pendientes para el departamento de Suchitepéquez.

El departamento de Escuintla se encuentra ubicado en la parte norte sobre la Sierra Madre, por lo que su estructura es accidentada y con una pendiente hacia la parte sur que termina en el mar (SEGEPLAN, 2010). En la Figura 17 se muestra la cuantificación de las pendientes para el departamento de Escuintla.

El departamento de Santa Rosa posee dos zonas topográficas: la norte, de superficie montañosa que se ubica sobre la Sierra Madre; y la sur, que corresponde a la costa y boca costa, con extensas planicies y valles que descienden hacia las playas del Océano Pacífico (SEGEPLAN, 2010). En la Figura 18 se muestra la cuantificación de las pendientes para el departamento de Santa Rosa.

El departamento de Jutiapa forma el final guatemalteco de la cordillera volcánica, que desciende del poniente a la parte oriental. Se ubica a altitudes medias entre 500 y 900 msnm, mientras que en el extremo opuesto esta entre 2000 y 3700 msnm (SEGEPLAN, 2010). En la Figura 19 se muestra la cuantificación de las pendientes para el departamento de Jutiapa.

En la Figura 20 y Figura 21 se muestra un mapa topográfico de Guatemala y de la costa sur, respectivamente.

Figura 14 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de San Marcos

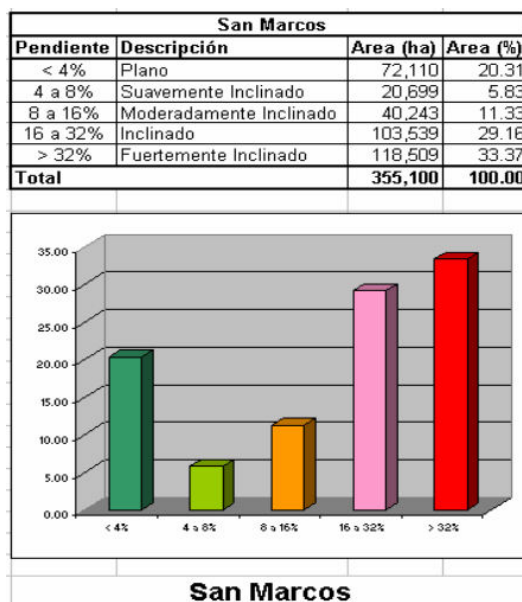
(Tamasiunas *et al.*, 2005)

Figura 15 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Retalhuleu

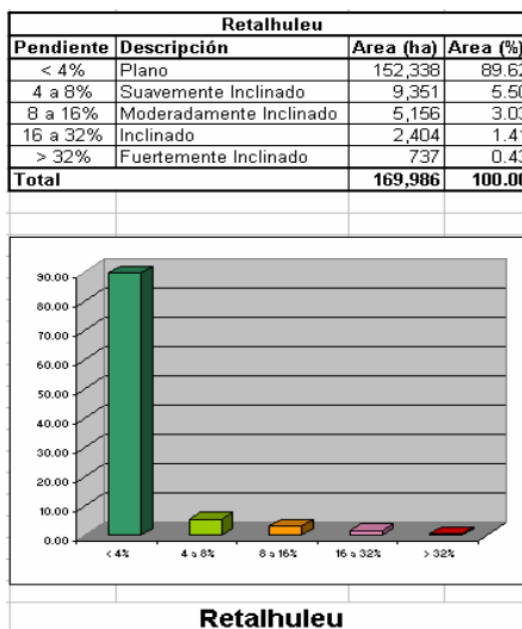
(Tamasiunas *et al.*, 2005)

Figura 16 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Suchitepéquez

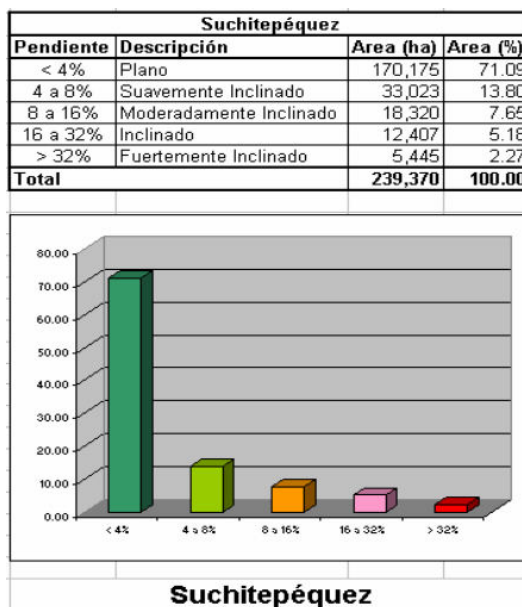
(Tamasiunas *et al.*, 2005)

Figura 17 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Escuintla

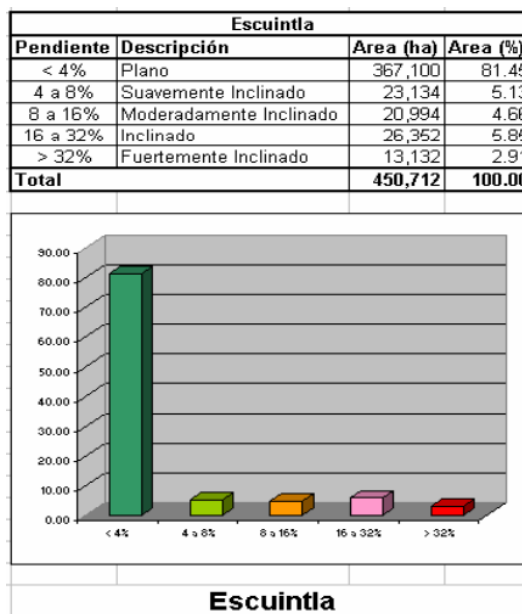
(Tamasiunas *et al.*, 2005)

Figura 18 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Santa Rosa

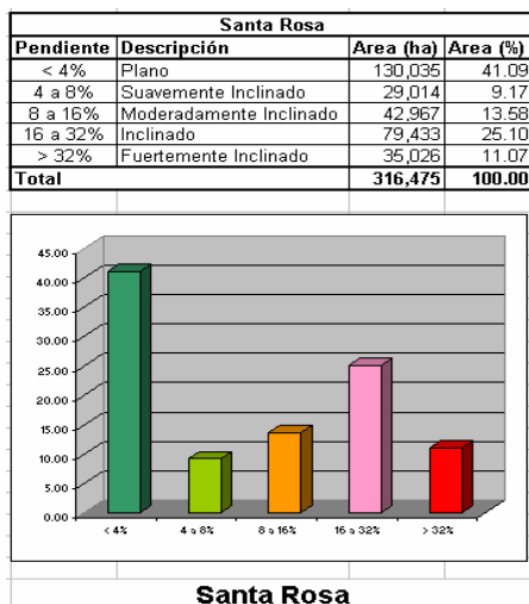
(Tamasiunas *et al.*, 2005)

Figura 19 Pendientes agrupadas según metodología USDA para el departamento de Jutiapa

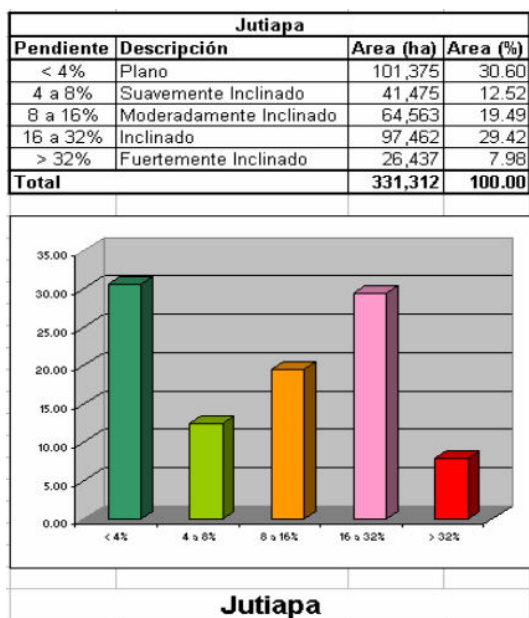
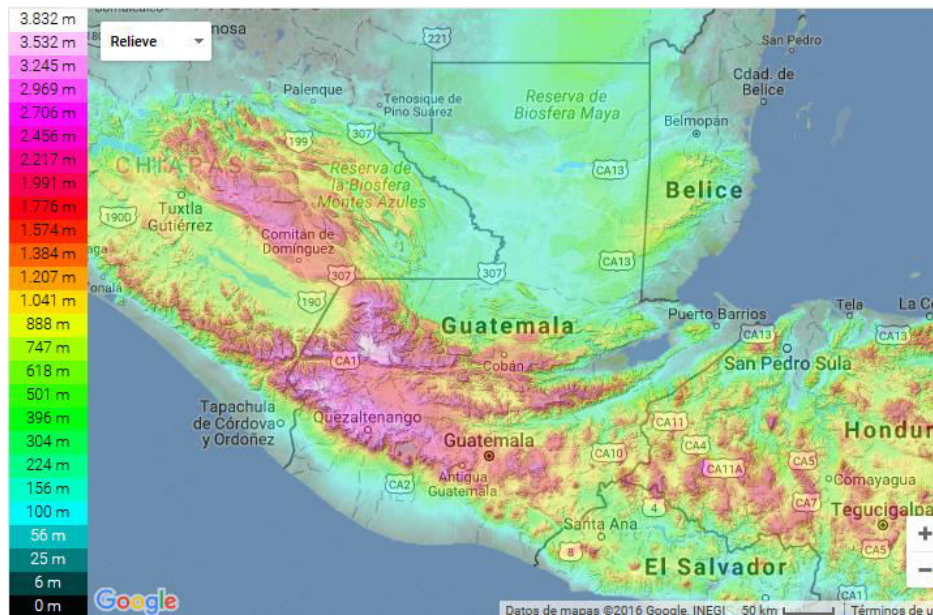
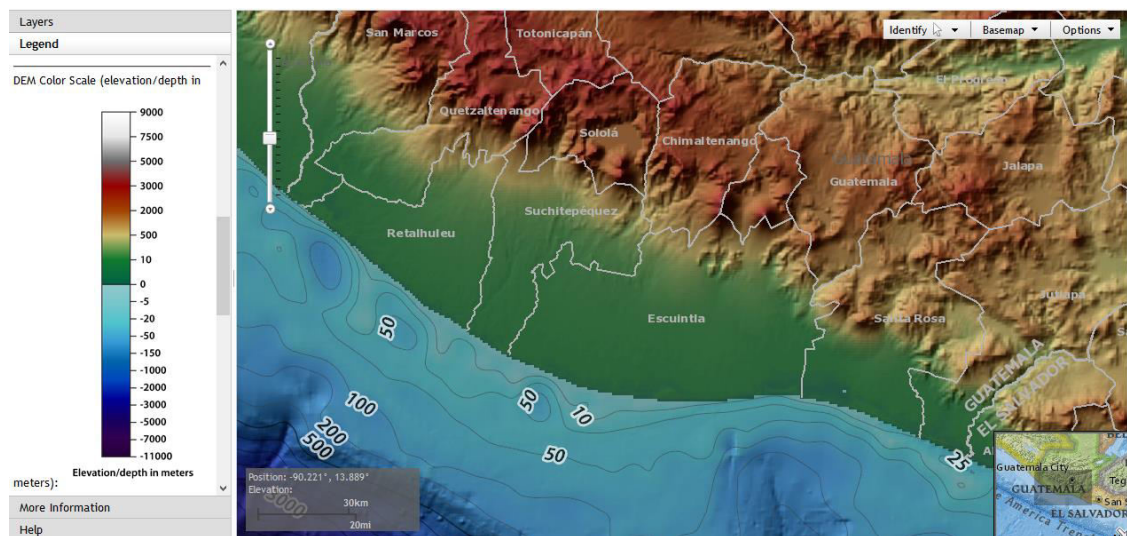
(Tamasiunas *et al.*, 2005)

Figura 20 Mapa topográfico de Guatemala



(Google, 2017b)

Figura 21 Mapa topográfico de la Costa Sur de Guatemala

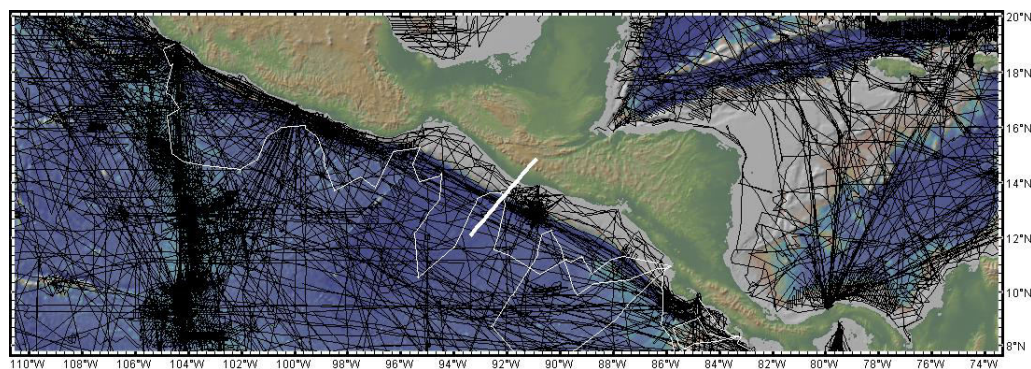


(NOAA, 2017)

3. **Batimetría.** La superficie de la costa sur de Guatemala no es regular, sus pendientes son elevadas frente a los departamentos de Escuintla y Santa Rosa. El límite entre las placas de Cocos y del Caribe forma un gran cañón submarino llamado Fosa Mesoamericana. Un hundimiento ocasionado por la frontera de subducción de las placas, se extiende desde el sur de México hasta la zona central de Costa Rica y en algunas partes puede alcanzar más de 4000 metros de profundidad. La parte menos profunda se encuentra

al sur de Costa Rica donde la placa de Cocos penetra muy superficialmente. En la Figura 22 se muestra un mapa de curvas de nivel para Mesoamérica, donde las líneas negras representan las curvas de nivel de la batimetría y la línea blanca fue la base para un perfil batimétrico de la costa sur de Guatemala.

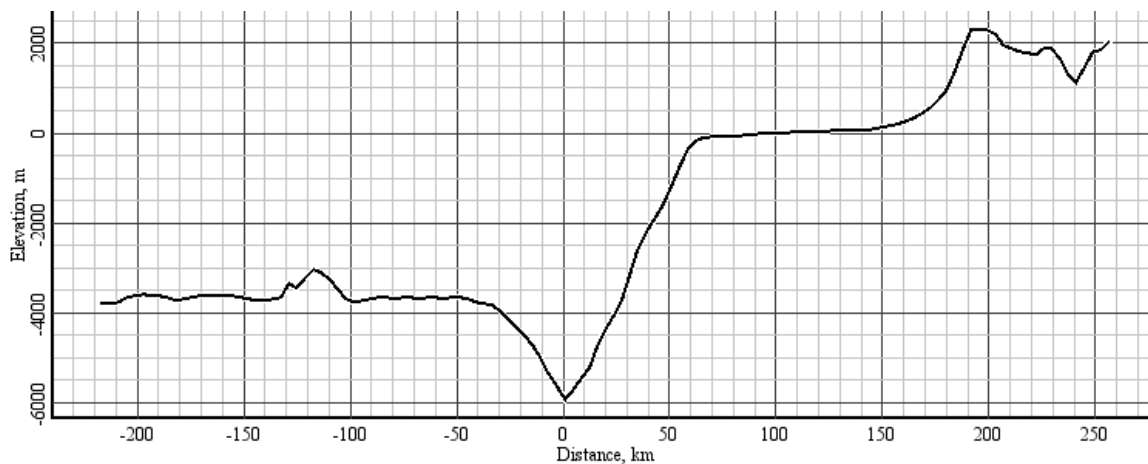
Figura 22 Mapa de curvas de nivel para Mesoamérica



(USGS, 2013)

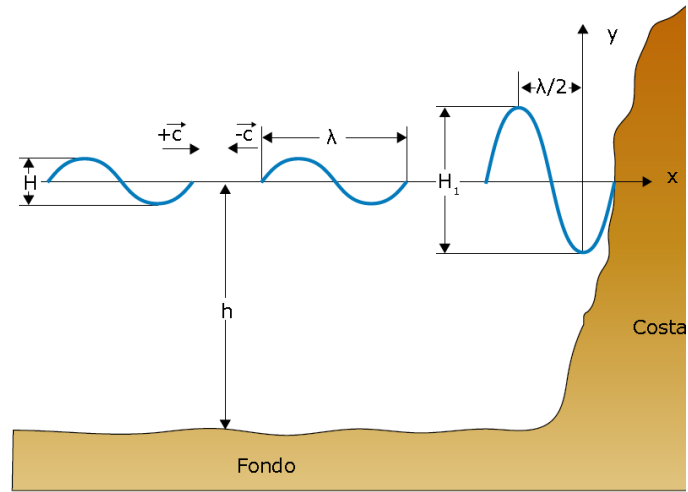
En la Figura 23 se observa el perfil batimétrico para la zona costera de Guatemala, donde el punto más bajo indica la zona más profunda de la Fosa Mesoamericana. Se observa que el talud ocasionado por la zona de subducción, la configuración topográfica y batimétrica le da una ventaja a Guatemala ante los tsunamis, a medida que la ola se acerca a la costa se produce un fenómeno de refracción de ola, este se origina cuando la ola choca con un obstáculo o barrera vertical, provocando la pérdida de la energía cinética y potencial. La suma de las ondas incidentes y la ola reflejada en el talud origina una onda estacionaria, en la que se anulan mutuamente los movimientos horizontales, fenómeno que se puede observar en la Figura 24.

Figura 23 Perfil batimétrico de la costa sur de Guatemala



(USGS, 2013)

Figura 24 Fenómeno de refracción de ola



(Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012a)

V. METODOLOGÍA

A. RECOPIACIÓN DE MARCO TEÓRICO

Para esta fase es necesario investigar varios temas:

- Tsunamis

Se recopilará la información sobre el estudio de los tsunamis a lo largo de la historia. Se obtiene información a partir de entidades tanto gubernamentales, como internacionales que se encargan de manejar, recopilar y controlar información sobre este tipo de fenómenos naturales. Se investigarán los mecanismos que los generan, sus fases de generación, propagación e inundación; las propiedades que los caracterizan, el impacto que estos tienen en las zonas costeras y los daños que pueden causar dependiendo su magnitud.

- Proyectos desarrollados

Es necesario recurrir a bibliotecas virtuales para recopilar trabajos de investigación y tesis en los cuales se hayan realizado proyectos relacionados con tsunamis para conocer la teoría en la que se han basado, los modelos matemáticos que han empleado o desarrollado y las herramientas que han seleccionado para llevar a cabo la simulación numérica de tsunamis.

También se realizará una búsqueda en repositorios de proyectos de código abierto (GitHub), aquellos que estuvieran relacionados al desarrollo de software que simulara tsunamis. Se deben filtrar de acuerdo a la cantidad de contribuciones que tengan, la documentación que contenga, el orden de su estructura, y el lenguaje de programación que empleen.

- Herramientas de Software

Se investigarán diversas herramientas de software relacionadas con sistemas de información geográfica, que sean de código abierto. Se recopilarán las ventajas y facilidades que estas proporcionan para determinar de qué forma estas se pueden combinar para construir y obtener los resultados que se esperan del software.

B. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL OBJETO DE ESTUDIO

Se estudiarán las características generales de la zona de estudio, la costa sur de Guatemala y un rango territorial del océano Pacífico que colinda con la costa sur de Guatemala, tomando en cuenta principalmente su topografía y batimetría.

C. SELECCIÓN DEL MODELO A EMPLEAR

Se investigarán diferentes modelos que se han empleado en proyectos anteriores para realizar la simulación de un tsunami. Luego de estudiarlos se seleccionará el que se considere más adecuado para la zona de estudio y los recursos (datos) iniciales que se poseen.

D. SELECCIÓN DE LA TECNOLOGIA A EMPLEAR EN EL SIMULADOR

Se seleccionarán las herramientas tecnológicas para el desarrollo del simulador, incluyendo el lenguaje de programación, así como las librerías que se requieran para el mismo.

E. DESARROLLO DEL SIMULADOR

El desarrollo del simulador se dividirá en las siguientes actividades descritas:

Estructuración del algoritmo: Se debe plantear la estructura de datos que se utilizará para el desarrollo del algoritmo. De esta forma se logrará un manejo fácil de los datos que se poseen.

Diseño de la interfaz gráfica: Se debe crear una interfaz intuitiva para el usuario cuando este utilice la aplicación. Es importante que los resultados que se presenten al usuario sean visibles y fáciles de entender.

Implementación de la estructura de datos y el algoritmo: Se implementará el algoritmo basado en el modelo para simular la propagación de un tsunami e inundación que este causaría. También se implementará la visualización de los resultados que se obtengan. Este algoritmo empleará los datos batimétricos de la zona de estudio y los valores iniciales que se proporcionen para el simulador.

Visualización de resultados: Los resultados que se obtengan deben ser representados gráficamente utilizando mapas dinámicos de la zona de estudio. Esta actividad se llevará a cabo en paralelo junto con el desarrollo del algoritmo de simulación, ya que es necesario probar frecuentemente el funcionamiento de las partes del algoritmo. Así mismo, se deben corregir aspectos visuales en la interfaz del simulador para que este sea fácil de comprender para el usuario.

F. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Realizar pruebas para distintos escenarios de tsunamis históricos que han afectado la costa sur del país. Discutir los resultados obtenidos de las pruebas del simulador.

G. DESARROLLO DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Demostrar el cumplimiento de los objetivos establecidos al inicio de forma fundamentada. Plantear recomendaciones a partir de las experiencias adquiridas a lo largo del desarrollo del trabajo de graduación.

VI. RESULTADOS

Las pruebas simuladas se realizaron en base a los casos listados por (Fernandez et al., 2000) en una recopilación histórica de tsunamis y terremotos que han ocurrido en la costa del Pacífico para Centro América.

Figura 25 Vista del área inundada por el tsunami de 1902, M=0, dirección: NE.



Figura 26 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1902, M=0, dirección: NE.



Figura 27 Vista de propagación del tsunami de 1902, M= 2, dirección: NO.

Indique en el mapa el punto de inicio, luego la dirección del tsunami



Figura 28 Vista de área inundada por el tsunami de 1902, M=2, dirección: NO.

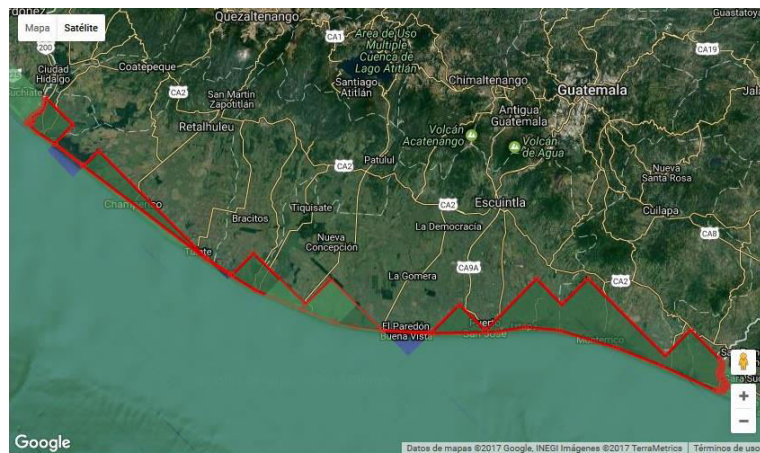


Figura 29 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1902, M=2, dirección: NO.

Resultados

Área inundada (km²):
1608.69 km².

Longitud total (m):
608113.94 m.

Figura 30 Vista del área inundada por el tsunami de 1902, M=0, dirección: NO.

Indique en el mapa el punto de inicio, luego la dirección del tsunami

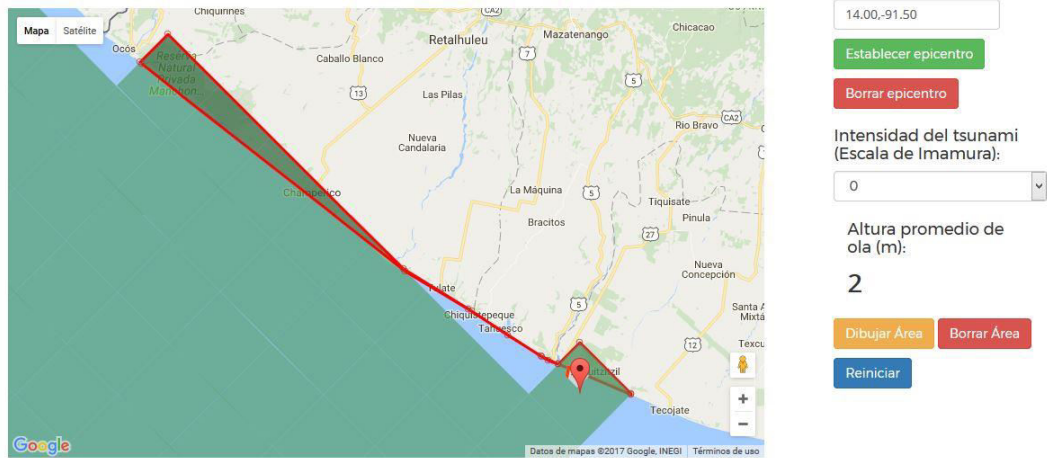


Figura 31 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1902, M=0, dirección: NO.



Figura 32 Vista del área inundada por el tsunami de 1950, M=0, dirección: E.



Figura 33 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1950, M=0, dirección: E.



Figura 34 Epicentro del tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.



Figura 35 Vista de propagación del tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.

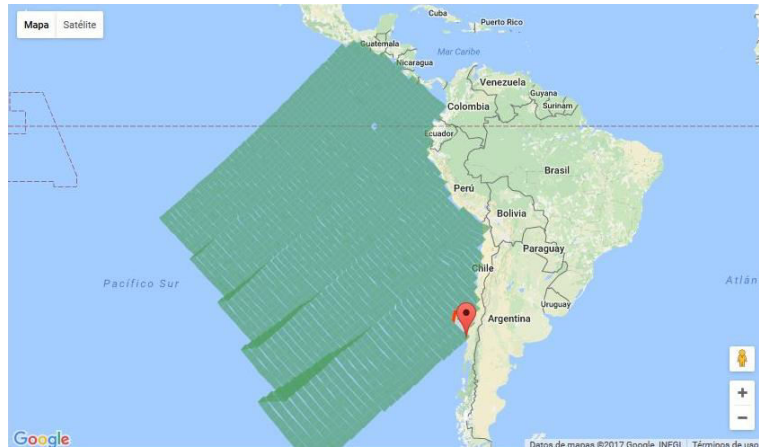


Figura 36 Vista del área inundada por el tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.

Indique en el mapa el punto de inicio, luego la dirección del tsunami



Epicentro (lat, long):

-38.24,-73.5

Establecer epicentro

Borrar epicentro

Intensidad del tsunami (Escala de Imamura):

2

Altura promedio de ola (m):

10

Dibujar Área

Borrar Área

Reiniciar

Figura 37 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1960, M=2, dirección: NO.



Figura 38 Vista del área inundada por el tsunami de 1915, M=0, dirección: N.

Indique en el mapa el punto de inicio, luego la dirección del tsunami

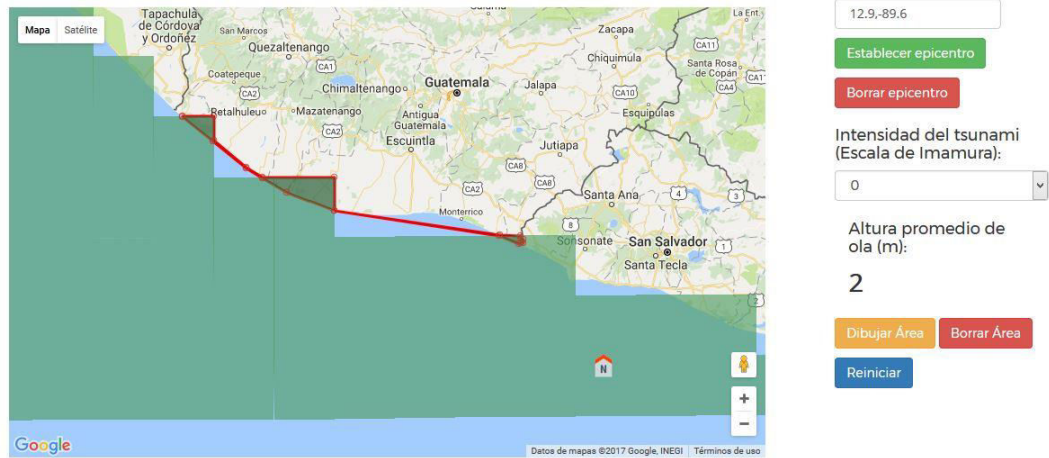


Figura 39 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1915, M=0, dirección: N.



Figura 40 Vista de propagación del tsunami de 1859, M=1, dirección: NE.

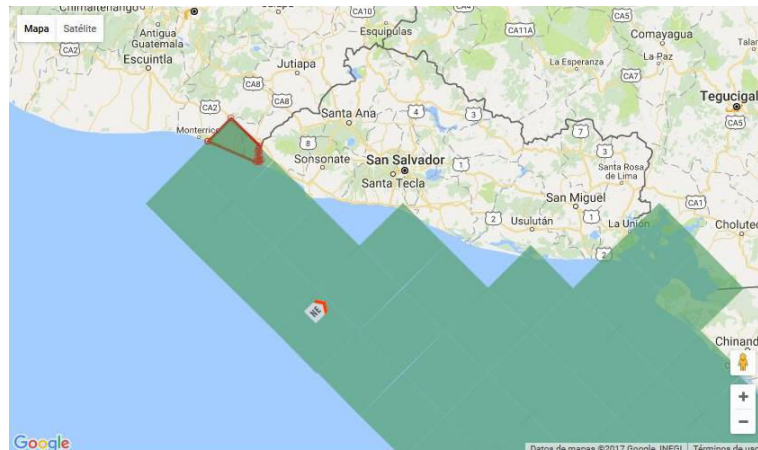


Figura 41 Vista del área inundada por el tsunami de 1859, M=1, dirección: NE.

Indique en el mapa el punto de inicio, luego la dirección del tsunami



Figura 42 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1859, M=1, dirección: NE.



Figura 43 Vista de propagación del tsunami de 1916, M=0, dirección: NE.

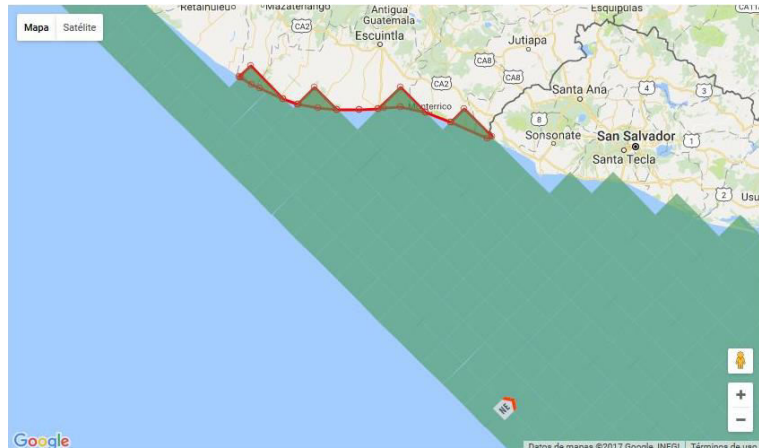


Figura 44 Vista del área inundada por el tsunami de 1916, M=0, dirección: NE.

Indique en el mapa el punto de inicio, luego la dirección del tsunami

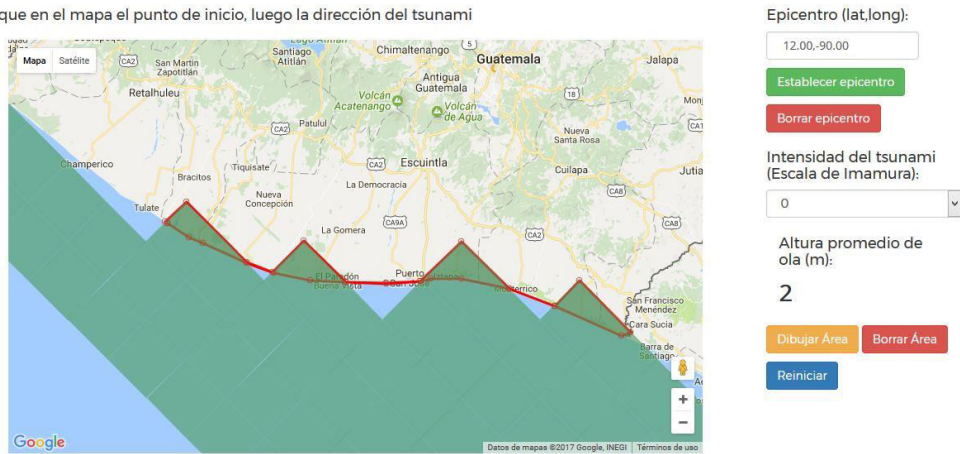


Figura 45 Área inundada y longitud de esta. Tsunami de 1916, M=0, dirección: NE.

Resultados

Área inundada (km2):
769.66 km2.

Longitud total (m):
391268.76 m.

El código fuente completo del proyecto se encuentra disponible en el repositorio de Github <https://github.com/SophiaMendez/SimuladorTsunami>

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los casos que se simularon fueron tomados de la recopilación histórica del Catálogo de Tsunamis de Centro América (Fernandez *et al.*, 2000). Este catálogo lista los terremotos y tsunamis que han ocurrido en la Costa del Pacífico, en Centro América. Indica el epicentro del terremoto que los generó y la locación del tsunami; en algunos casos menciona la magnitud del tsunami generado, aunque no en todos, ya que no hay documentación histórica que referencie la magnitud de dicho tsunami.

En este catálogo se listan 37 casos de terremotos y tsunamis ocurridos en la costa del Pacífico en Centro América, y de estos se tomaron 8 casos, en los cuales figura la costa de Guatemala y el Salvador. Se tomó en cuenta la costa de El Salvador ya que, por su cercanía con Guatemala, como lo muestra la Figura 5, y el lugar donde se han generado terremotos con probabilidad de tsunami cerca de la costa de El Salvador, estos también pueden afectar la costa sur de Guatemala.

El primer caso simulado se muestra en la Figura 25 y Figura 26, las cuales representan la vista del área inundada y la medición de esta respectivamente. Este tsunami se generó el 18 de enero de 1902, cerca de Ocos, Guatemala, dentro del área A que se observa en la Figura 5. Su epicentro estuvo en la coordenada (lat-long) 14.49,-92.21, fue de grado 0 en la escala de Imamura, con una altura de ola promedio de 2 metros, con dirección al Noreste. Como se observa en la Figura 26, el área aproximada de inundación es de 385.79 km². El terremoto que lo ocasionó tuvo una magnitud de 6.3 y ocurrió por las placas de Cocos-Caribe.

El segundo caso es uno de los más fuertes según (Fernandez *et al.*, 2000). Fue un tsunami ocurrido el 26 de febrero de 1902, de grado 2, con una altura de olas promedio de 10 metros. En este hecho 185 personas perdieron la vida. Este tsunami afectó la costa sur de Guatemala y El Salvador, se dio por las placas de Cocos-Caribe. Su epicentro estuvo en la coordenada (lat-long) 13.00,-89.5 con dirección al Noroeste. La propagación de este tsunami se observa en la Figura 27, y el área afectada se puede visualizar en la Figura 28, lo que da como resultado un área de inundación de 1608.69 km² aproximadamente como se observa en la Figura 29. Este tsunami ocurrió dentro del área C que se puede observar en la Figura 5.

El tercer caso que se simuló fue el tsunami ocurrido el 19 de abril de 1902, que se encuentra dentro del área A que se observa en la Figura 5. Este tsunami fue causado por un terremoto de magnitud 7.5. Dicho tsunami fue de grado 0, con epicentro en la coordenada (lat-long) 14.00, -91.5, con dirección Noroeste como se observa en la Figura 30 donde se puede observar también el área que resulta inundada, lo cual da un área aproximada de 213.83 km² como lo muestra la Figura 31.

El cuarto caso simulado fue el tsunami ocurrido el 23 de marzo de 1950 que afectó a la costa sur de Guatemala y El Salvador. Dicho tsunami fue de grado 0, con epicentro en la coordenada (lat-long) 14.10,-91.80, con dirección Este. El terremoto que generó este tsunami fue de Magnitud 7.3, dentro del área A que se observa en la Figura 5. El área afectada puede observarse en la Figura 32, lo que da un área inundada de 355.12 km² aproximadamente como se muestra en la Figura 33.

El quinto caso no es similar a los anteriores, ya que no se generó en las cercanías a la costa sur de Guatemala o El Salvador, sino que se generó en Chile, el 22 de mayo de 1960, ha sido considerado una de las catástrofes naturales más grandes de la historia. Este tsunami se generó por un terremoto de magnitud 8.5 con epicentro en la coordenada (lat-long) -38.24,-73.5 como se muestra en la Figura 34. Dicho tsunami fue de grado 0, con olas de 10 metros aproximadamente que se propagó por todo el Pacífico como se observa en la Figura 35, tocando la costa sur de Guatemala. El área afectada por este tsunami se muestra en la Figura 36, lo que da un área inundada de 8116.40 km² aproximadamente como indica la Figura 37.

El sexto caso que se simuló fue el del tsunami ocurrido el 7 de septiembre de 1915, cerca de las costas de El Salvador, dentro del área C de la Figura 5. Este tsunami fue generado por un terremoto de magnitud 7.7. Su epicentro se encuentra en la coordenada (lat-long) 12.9,-89.6, con dirección al Norte, fue de grado 0 con olas de 2 metros de altura en promedio. La propagación y área afectada puede observarse en la Figura 38. Lo que da como resultado un área inundada de 848.4 km² aproximadamente como se muestra en la Figura 39.

El séptimo caso simulado fue el del tsunami ocurrido el 9 de diciembre de 1859, cerca de las costas de El Salvador, dentro del área C de la Figura 5. Este tsunami se generó a partir de un terremoto de magnitud 7.0. Su epicentro está en la coordenada (lat-long) 12.75,-89.75, con dirección al Noreste. Fue de grado 1, con olas de 5 metros de altura en promedio. La propagación de este tsunami se puede apreciar en la Figura 40, y el área afectada de la costa sur de Guatemala se aprecia en la Figura 41, dando como resultado un área inundada de 486.01 km² aproximadamente como se refleja en la Figura 42.

El octavo y último caso que se simuló fue el tsunami ocurrido el 25 de mayo de 1916, cerca de las costas de El Salvador, dentro del área C representado en la Figura 5. Este tsunami fue generado por un terremoto de magnitud 7.5 con epicentro en la coordenada (lat-long) 12.00,-90.00, cercano a la zona de subducción de las placas de Cocos-Caribe, fue de grado 0 con olas de 2 metros de altura en promedio, con dirección al Noreste. Su propagación puede observarse en la Figura 43, afectando la costa Sur de Guatemala como se observa en la Figura 44, dando como resultado un área inundada de 769.66 km² aproximadamente.

Todos los tsunamis simulados son considerados tsunamis locales, a excepción del quinto caso, que se considera un tsunami distante. De acuerdo a (Fernandez et al., 2000), los tsunamis se clasifican en tres categorías: se considera tsunamis locales a todos aquellos que ocurren a menos de 100 km de distancia de la costa. Existen también los tsunamis regionales, que son los que ocurren entre 100 y 750 km de distancia de la costa; y los tsunamis distantes, que ocurren a más de 750 km de distancia de la costa.

Las costas de Centro América, al igual que otras áreas alrededor del mundo, están expuestas a estos 3 tipos de tsunamis, pero principalmente a los tsunamis locales, tal como se puede observar en 7 de los 8 casos simulados. La mayoría de estos tsunamis se generaron por terremotos ocasionados por la interacción entre las placas de Cocos-Caribe. Aunque se menciona la magnitud de los terremotos que los ocasionaron, no se puede establecer una relación directa entre la magnitud de un terremoto y el grado del tsunami que origina. Ya que como indica (Gusiakov, 2008), “la energía transferida a las olas de un tsunami es de orden de 1% de la energía total liberada por un terremoto”.

Los parámetros de entrada que se solicitan son la coordenada del epicentro donde se generó el tsunami, la dirección de propagación que tomará y el grado del tsunami, este último para establecer la altura promedio que tendrán las olas del tsunami al arribar a la costa. No se solicitan datos de entrada más complejos, como los parámetros de la falla ocasionada, por ejemplo, ya que esto complicaría el uso del simulador, y la mayoría de veces no se cuenta con todos los parámetros que definen una falla de origen tectónico que pueda generar un tsunami. Como indica (Macinnes *et al.*, 2013), “La selección de modelos fuente inexactos es una de las principales fuentes de error en las simulaciones de inundación por tsunami.” Por lo que ellos mencionan que las futuras investigaciones que requieran simulación de tsunami se enfrentaran a la difícil tarea de elegir un terremoto fuente idóneo que proporcione todos los parámetros necesarios para recrear con mayor precisión las características del tsunami.

Por esta razón el cálculo del área inundada en cada caso es realizado a partir del trazo del área afectada. Al realizar el trazo del área afectada, luego de simular la propagación e inundación del tsunami, este se hizo con la mayor precisión posible, adaptando el área a las zonas secas que resultarían inundadas por dicho tsunami. A partir de este trazo también se calcula la longitud en metros que rodea a toda el área inundada.

VIII. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de las particularidades de los tsunamis: los mecanismos que los generan, sus características físicas, las escalas cuantitativas y cualitativas que se les han establecido y el impacto que pueden tener en una zona costera. El análisis de la zona de estudio y su colindancia con el océano Pacífico contempló los parámetros topográficos y batimétricos que constituyeron las variables de entrada para el simulador.

Se realizó una investigación sobre los modelos numéricos que describen la generación y propagación de un tsunami, así como la inundación que causa. Atendiendo a sus características y a la zona estudiada, se optó por el modelo de aguas someras en una dimensión por considerarse el más adecuado.

Se consideró, de acuerdo al estudio realizado, que la tecnología a utilizar fue Javascript como lenguaje de programación y el API de Google Maps v3.0 para obtener los datos batimétricos y topográficos de la zona de estudio y hacer parte de la simulación.

Se elaboró un algoritmo para realizar un simulador numérico a partir de la tecnología y modelo seleccionados, para calcular el área afectada en la zona costera analizada.

Se determinó que, en promedio, la costa sur de Guatemala está propensa a tsunamis de grado 0 y grado I que se originen en el océano Pacífico cerca de la frontera con México, la frontera con El Salvador y cerca de la Fosa Mesoamericana.

Se realizó la simulación de un tsunami distante el cual afectó la costa sur de Guatemala debido a su epicentro, su dirección de propagación y grado. Aunque la costa sur de Guatemala tiene una probabilidad media de ser afectada por un tsunami local, regional o distante, cuenta con una barrera geográfica, la Fosa Mesoamericana, que, gracias a su profundidad, reduce el impacto de las olas al acercarse a la zona costera.

Los distintos escenarios que se simularon representan tsunamis que han afectado la costa sur de Guatemala. Las simulaciones se hicieron tomando en cuenta los valores iniciales que se conocían; para los casos en los que no se tenía conocimiento de todos sus valores iniciales, se establecieron de acuerdo al valor histórico de escenarios similares. Y se obtuvo el área aproximada en km² que resultaría afectada para cada escenario.

Ya que actualmente no existen mapas de estructuras para la zona de estudio, esta se consideró como una superficie libre de obstáculos.

IX. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede hacer una estimación de las pérdidas económicas en cuanto a suelos, ganadería, poblaciones, bosques, industria, etc. Aunque es necesario emplear datos actualizados en cuanto al crecimiento de las poblaciones asentadas a lo largo de la costa sur de Guatemala, así también de las zonas que se emplean para agricultura.

Al ser un proyecto de código abierto, se pueden ampliar las funcionalidades y el enfoque del mismo, a través del empleo de las funcionalidades de las tecnologías seleccionadas, con el fin de extraer diversos resultados que respondan a los intereses que puedan surgir del proyecto.

Se deben crear mapas cartográficos de estructuras para la costa sur de Guatemala. De esta forma se pueden considerar como variables al realizar una simulación de inundación.

Se deben realizar estudios más minuciosos de la batimetría y las condiciones geológicas de la costa del pacífico de Centro América para poder definir zonas tsunamigénicas a lo largo de esta.

A partir de los mapas de inundación que se obtienen, se pueden diseñar planes de evacuación y contingencia para desarrollar sistemas de alerta temprana contra tsunamis en la región.

A partir del trazo del área territorial que resultaría afectada por la inundación de un tsunami se puede exportar las coordenadas de este en plantillas shape para emplearlas más adelante en la superposición de mapas para estudios posteriores.

Instalar boyas del sistema DART que permitan monitorear en tiempo real o cercano al tiempo real el cambio en la altura de las olas en la zona de estudio. De esta forma será posible generar gráficas que describan la propagación, longitud de onda, y período de las olas con respecto a la batimetría de la zona de propagación.

Para futuras investigaciones, seleccionar un terremoto tsunamigénico fuente idóneo que proporcione los parámetros iniciales exactos para recrear con mayor exactitud las características de un tsunami.

X. BIBLIOGRAFÍA

- Athan, T., *et al.* 2016. *QGIS User Guide*. http://docs.qgis.org/2.0/pdf/QGIS-2.0-UserGuide-ca_ES.pdf [Octubre 2016]
- Bale, Derek *et al.* 2002. *A wave propagation method for conservation laws and balance laws with spatially varying flux functions*. págs. 955–978.
- Berger, Marsha J., *et al.* 2011. *The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement*.
- Berger, M.; Rigoutsos, I. 1991. *An algorithm for point clustering and grid generation*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. págs. 1278–1286. <https://ieeexplore.ieee.org/document/120081> [Octubre 2016]
- Chadwin, Tom. 2016. *qgis2web*. <https://github.com/tomchadwin/qgis2web> [Octubre 2016]
- Chow, Ven Te; Maidment, David R. y Mays, Larry W. 1994. *Hidrología aplicada*. <https://es.slideshare.net/karenadrianatv/hidrologa-aplicada-ven-te-chow-78614961> [Octubre 2016]
- Comisión Oceanográfica Intergubernamental. 2014. *Tsunamis: Las Grandes Olas* 3^a ed. París. UNESCO.
- Fernandez, M., *et al.* 2000. *Tsunamis and Tsunami Hazards in Central America*. *Natural Hazards*. págs 91–116.
- Google. 2017. Google Maps. <https://www.google.es/maps/>
- Google. 2017. Google Maps API Web Services. <https://developers.google.com/maps/web-services/overview?hl=es-419> [Noviembre 2016]
- Google. 2017. Google Maps Platform. Elevation Service. <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/elevation?hl=es-419> [Noviembre 2016]
- Gusiakov, Viacheslav. 2008. *Tsunami history -recorded*.
- Hyperphysics; G. A. Macdonald *et al.* y C. K. Green. 2012. *Tsunami*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Waves/tsunami.html> [Octubre 2016]
- Hyperphysics y Bascom, W. 2012. *Wave Motion*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/watwav.html#c3> [Octubre 2016]
- INSIVUMEH. 2005. *Sismología*. http://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/indice_sismo.htm [Octubre 2016]
- INSIVUMEH. 2015. *Tsunami*. <http://www.insivumeh.gob.gt/tsunami.html> [Octubre 2016]
- Leveque, Randall J.; George, David L. y Berger, Marsha J. 2011. «Tsunami modeling with adaptively refined finite volume methods». *Acta Numerica*. 20 <https://doi.org/10.1017/S0962492911000043> [Octubre 2016]
- MacInnes, Breanyn T. *et al.* 2013. *Comparison of earthquake source models for the 2011 Tohoku event*

- using tsunami*. <http://faculty.washington.edu/rjl/macinnes-esupp> [Octubre 2016]
- Martínez, J. C.; Tavera, Hernando e Instituto Geofísico del Perú. 2013. *Compendio de trabajos de investigación realizado por estudiantes durante el año 2012*. Instituto Geofísico Del Perú
- Morales, Aurelio. 2015. *Por qué utilizar OpenLayers y GeoExt*. <https://mappinggis.com/2012/11/por-que-utilizar-openlayers-y-geoext/> [Octubre 2016]
- Morales, Aurelio. 2016. *Crea aplicaciones webmapping con QGIS*. <https://mappinggis.com/2016/03/crea-aplicaciones-webmapping-con-qgis/> [Octubre 2016]
- Morales, Aurelio. 2016. *GeoExt 3: Enriquece tus visores webmapping de OpenLayers 3*. <https://mappinggis.com/2016/01/geoext-3-enriquece-tus-visores-webmapping-de-openlayers-3/> [Octubre 2016]
- Morales, Aurelio. 2017. *Cómo crear un mapa con OpenLayers 3*. <https://mappinggis.com/2013/04/como-crear-un-mapa-con-openlayers-3/> [Octubre 2016]
- NOAA. 2017. *Bathymetric Data Viewer*. <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/> [Octubre 2016]
- ONU. 2008. *Hacia la gestión de riesgo de desastre por tsunamis en América Central*. 15. http://www.eird.org/esp/revista/No_15_2008/art9.html [Octubre 2016]
- Ponce, Victor Miguel. 2013. *La competencia entre las ondas cinemáticas y dinámicas*. http://ponce.sdsu.edu/cuentos_competencia.html [Octubre 2016]
- Pontificia Universidad Católica de Chile. 2012. *Características físicas de un tsunami*. http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h712.html [Octubre 2016]
- Pontificia Universidad Católica de Chile. 2012. *Impacto de un tsunami*. http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h713.html [Octubre 2016]
- Sánchez, Jorge Macías; Fernández, Luis Miguel y González, José Manuel. 2012. *Deslizamientos submarinos y tsunamis en el Mar de Alborán. Un ejemplo de modelización numérica*. Instituto Español de Oceanografía
- SEGEPLAN. 2010. *Planificación del Desarrollo a nivel departamental*. <http://www.segeplan.gob.gt/nportal/index.php/planificacion-del-desarrollo/departamental> [Octubre 2016]
- Tamasiunas, José Miguel Duro *et al*. 2005. *Atlas temático de la República de Guatemala*. 2ª ed. Guatemala: MAGA
- UNESCO. 1996. Curso sobre Modelación Numérica de Tsunamis Proyecto TIME. Comisión Oceanográfica Intergubernamental Informes de Cursos de Formación COI-SHOA-CICESE. Valparaiso, Chile. 11 de Marzo - 11 de Mayo de 1996.

UNESCO. 2013. *Glosario de tsunamis*.

USGS. 2013. *Bathymetry*. Pacific Coastal and Marine Science Center

<http://walrus.wr.usgs.gov/infobank/i477np/html/i-4-77-np.bath.html>

XI. GLOSARIO

- **Aguas someras:** aguas poco profundas.
- **Altura máxima de inundación:** diferencia entre la elevación de la marca de agua local más alta y la elevación del nivel del mar en el momento del ataque de un tsunami.
- **Escala Soloviev-Imamura:** Escala de intensidad modificada por Soloviev, a partir de la escala de intensidad Imamura. Lida, que calcula la intensidad I de un tsunami de acuerdo a la fórmula

$$I = \frac{1}{2} + \log_2 H_{av} \quad (16)$$

Donde H_{av} es la altura media de las olas a lo largo de la costa más cercana. Esta escala se utiliza en los catálogos de tsunamis mundiales compilados por la NGDC/NOAA y el Laboratorio de Tsunamis de Novosibirsk como el principal parámetro para el tamaño del tsunami.

- **Intensidad:** Potencia, fuerza o energía extrema.
- **Magnitud de Momento:** escala sismológica logarítmica empleada para medir y comparar terremotos. Basada en la medición de energía total que se libera en un sismo. Introducida en 1979 por Thomas C. Hanks y Hiroo Kanamori como sucesora de la escala sismológica de Richter.
- **Magnitud:** número asignado a una cantidad, mediante dicha cantidad puede compararse con otras de la misma clase.
- **Marea de tormenta:** marejada ciclónica. Inundación costera asociada con un sistema atmosférico de baja presión. Es producto de los vientos en altura que empujan la superficie oceánica. El viento hace que el agua se eleve por encima del nivel normal del mar.
- **Meteorológico:** relacionado a la meteorología.
- **Modelo C3:** modelo de propagación de tsunamis desarrollado y validado por el IH Cantabria.
- **Modelo COMCOT:** modelo de 2 dimensiones que ecuaciones no lineales de aguas someras.
- **NGDC/NOAA:** National Geophysical Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration.
- **NOAA:** Administración Nacional Oceánica y atmosférica, sus actividades se centran en condiciones de los océanos y de la atmosfera.
- **NTL/ICMMG:** Novosibirsk Tsunami Laboratory of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics.

- **PTWC:** Centro de Alerta contra Tsunami en el Pacífico. El PTWC es la oficina principal del Sistema operacional de Alerta contra Tsunami en el Pacífico y trabaja estrechamente con otros centros nacionales y regionales supervisando estaciones sísmicas mareográficas alrededor del Océano Pacífico, para evaluar terremotos potencialmente tsunamigénicos. El PTWC es operado por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos.
- **Recogimiento:** (run-up) altura máxima de penetración/inundación.
- **Riesgo de Tsunami:** La probabilidad que un litoral particular sea golpeado por un tsunami multiplicado por lo que esté expuesto a ser dañado y afectado a lo largo de esa costa. En términos generales, el riesgo es la amenaza multiplicada con la exposición (vulnerabilidad).
- **Sismogénico:** de origen sismológico, sísmico.
- **Software de código abierto:** (open source software) es el software cuyo código fuente es publicado bajo una licencia de software compatible con la Open Source Definition, o forma parte del dominio público.
- **Tren de Olas:** serie de olas que conforman un tsunami
- **Tsunami:** serie de ondas de longitud y período sumamente largo, generado por perturbaciones asociadas con terremotos, derrumbes submarinos o erupciones volcánicas. Estas ondas pueden alcanzar grandes dimensiones y viajar por todo el océano con poca pérdida de energía.
- **Tsunamigénico:** Hace referencia a aquellos terremotos, usualmente producidos en zonas mayores de subducción en los límites de las placas continentales, tales como las que bordean el Océano Pacífico, que pueden generar tsunamis
- **USGS:** El servicio geológico de los Estados Unidos, agencia científica que controla el centro nacional de información sísmica, que se encarga de detectar la localización y magnitud de terremotos alrededor del mundo
- **Volcanogénico:** de origen volcánico.