



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
NICARAGUA,  
MANAGUA

UNAN - MANAGUA

**RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Trabajo Monográfico para optar al Título de:

**Lic. Física con mención en Geofísica**

**TEMA:**

**Modelamiento de la amenaza por inundación debido a tsunami  
en la costa de Pochomil.**

**AUTORA:**

**Br. Ninoska Jeannette Maltéz Pérez**

**TUTORES:**

**M.Sc. Greyving José Argüello Miranda**

**M.Sc. Humberto Alfonso García Montano**

**Abril, 2021.**



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
RECINTO UNIVERSITARIO RUBEN DARIO  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE FISICA**

*Managua, martes, 24 noviembre 2020*

## Carta de aprobación del tutor

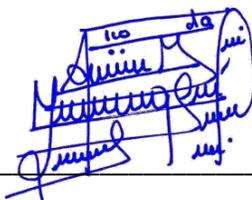
Tribunal examinador  
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua  
Presente

Manifiesto mi conformidad de tutor de la Br. Ninoska Jeannette Maltéz Pérez, con carnet número 13017897 para optar al título de Licenciatura en física con mención en geofísica, en el desarrollo del trabajo monográfico que lleva por título “Modelamiento de la amenaza por inundación debido a tsunami en la costa del Pochomil”, para que sea establecido la comisión de revisión y defensa acorde al Reglamento Universitario y la estudiante goce de los derechos que le correspondan.

Por lo cual estoy de acuerdo en:

1. He dado seguimiento a los lineamientos establecido para optar al título de Licenciatura en física con mención en geofísica y cumple con los requerimientos mínimos el presente trabajo para su defensa.
2. Se ha supervisado y avalado los informes y cambios solicitados al estudiante y el cumplimiento de las diversas partes que correspondan al desarrollo de la monografía.
3. Se ha hecho cumplir los principios éticos del estudiante en la elaboración del proyecto de monografía y la verificar la autenticidad de las citas bibliográficas.

Atentamente



MSc. Greyving José Argüello  
Miranda Sismólogo - INETER

Tutor

C.c. Estudiante  
C.c. Tutor  
C.c. Archivo

Managua, lunes 23 de Noviembre

Dr. Noel Zelaya Vanegas  
Director del Departamento de Física  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
UNAN-Managua

De mi mayor consideración

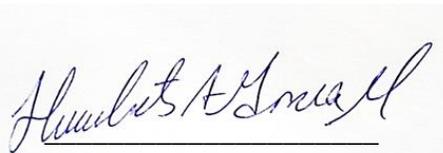
Tengo el agrado de dirigirme a usted en relación al trabajo de tesis para optar al título de:  
Licenciada en Física con mención en Geofísica, desarrollado por la Br. **Ninoska Jeannette Maltéz Pérez**, donde me desempeñe como tutor.

Puedo asegurar que el trabajo que lleva por el título **MODELAMIENTO DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN DEBIDO A TSUNAMI EN LA COSTA DE POCHOMIL**. Se encuentra terminado y la Br. Maltéz Pérez puede proceder a efectuar los trámites pertinentes para su defensa de trabajo de graduación.

Además, este trabajo cumple con los requisitos de una investigación de alto nivel con los conocimientos científicos y técnicos que exige el perfil de un Geofísico.

Aprovecho la ocasión para saludarlo.

Atentamente



Prof. Humberto A. García Montano  
Departamento de Física  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
UNAN-Managua

Arc.

## Contenido

Dedicatoria	I
Agradecimiento	II
Resumen	III

### CAPITULO I

Introducción	1
--------------	---

### CAPITULO II

Planteamiento del problema	3
----------------------------	---

### CAPITULO III

Justificación	4
---------------	---

### CAPITULO IV

Objetivos	5
4.1.Objetivo General	5
4.2.Objetivo Específico	5

### CAPITULO V

Antecedentes	6
--------------	---

### CAPITULO VI

Marco tectónico	8
6.1. Estudio de la Sismología en el campo de la Geofísica	8
6.2. Tectónica de placas en Nicaragua	9
6.3. La Depresión de Nicaragua.	9

6.4.	Fosa Mesoamericana	10
6.5.	Zona intraplaca del Pacífico de Nicaragua	11
6.7.	Amenaza sísmica en Nicaragua	12
6.7.1.	Zona Sísmica del Golfo de Fonseca	13
6.7.2.	Zona Sísmica de Masachapa	13
6.7.3.	Zona Sísmica de Papagayo	13
<b>Marco Teórico</b>		<b>17</b>
6.8.	Definición de terremoto.	17
6.9.	Magnitud de un sismo	18
6.10.	Mecanismo focal de un sismo	19
6.11.	Concepto de Tsunami	20
6.12.	Causas de los Tsunamis	21
6.13.	Terremoto que generan tsunamis.	22
6.14.	Magnitud del tsunami	25
6.15.	Características físicas de las ondas.	29
6.16.	Modelado de tsunami	31
6.17.	Modelado de escenario de inundación	34
6.18.	Factores del Riesgo	40
6.19.	Mitigación de desastres	41

## CAPITULO VII

<b>Hipótesis</b>	<b>43</b>
------------------	-----------

## CAPITULO VIII

<b>Diseño metodológico</b>	<b>44</b>	
8.1.	Área de estudio	44
8.2.	Tipo de estudio	45
8.3.	Metodología	45
8.3.1.	Registro de datos históricos de tsunamis	45
8.3.3.	Diseño de un tsunami hipotético	47

## **CAPITULO IX**

<b>ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>50</b>
---	-----------

## **CAPITULO X**

<b>Conclusiones</b>	<b>85</b>
---------------------	-----------

## **CAPITULO XI**

<b>Recomendaciones</b>	<b>87</b>
------------------------	-----------

## **CAPITULO XII**

<b>Referencias</b>	<b>88</b>
--------------------	-----------

## **CAPITULO XIII**

<b>Anexo</b>	<b>94</b>
--------------	-----------

## Índice de Figura

Figura 1. División de la Geofísica para los campos de la ciencia y tecnología (UNESCO, 2004). _____	8
Figura 2. Tectónica regional de América Central (Harlow & White, 1985). _____	9
Figura 3. Subducción de placa Coco bajo la placa Caribe (OVCICORI UNA). _____	10
Figura 4. Fuentes sísmicas que se distinguen en Nicaragua con base a características de cantidad de producción de sismos, rango de profundidad de los focos, sismos extremos (Segura, 2016). _____	12
Figura 5. a) Indica la cobertura temporal de la muestra sísmica para la zona de subducción. Después de 1980 la captación de datos decreció rápidamente coincidiendo con el recrudecimiento de los problemas socios políticos que vivió el país en los años inmediatos al triunfo de la Revolución Popular Sandinista. b) refleja que la mayor producción de sismos ocurre en la parte somera entre 0.0 y 40 km, que corresponde a la mayor flexión de la corteza en subducción e interacción entre las placas. Además la generación de sismos es menor de los 300 km lo cual significa que frente a las costas de Nicaragua solo se producen sismos someros e intermedios. c) muestra la densidad sísmica (Wiemer y Zuniga 1994; Wiemer 2001), las partes rojas reflejan las zonas de mayor producción de sismos descendiendo hacia azul con menor producción. _____	12
Figura 6. Fronteras de placas (Andrey, 2019). _____	17
Figura 7. Hipocentro y epicentro de un sismo (UCE, 2010). _____	18
Figura 8. Representación de una ola de tsunami (Fernández, 2017). _____	21
Figura 9. Litosfera oceánica y Corteza continental (Mallen, 2015). _____	23
Figura 10. Generación de tsunami por falla inversa. Movimiento de placa en zona de subducción (Espín, 2012). _____	23

Figura 11. a) Falla normal b) Falla Inversa c) Falla lateral (Niemeyer, 1999).	24
Figura 12. Definición de ángulos Strike, Dip y Rake para una modelo de falla (Wilkerson, 2019).	25
Figura 13. Características de una onda (Levin & Nosov, 2009).	29
Figura 14 . Características físicas de un tsunami al llegar a la costa (Levin & Nosov, 2009).	30
Figura 15. Representación del sistema escalonado salto de rana (Koshimura, 2009).	35
Figura 16. Parámetros de ruptura de fallas (Imamura & Yalciner, 2006).	37
Figura 17. Parámetros del plano de falla. Se representa el bloque que subduce en una falla inversa (Sakate, 2014).	37
Figura 18. Boleta estructural. Modificado de (SINAPRED, INETER, UNAN-Managua, & otros, 2017).	46
Figura 19. Datos de la cuadrícula de batimetría GEBCO para diferentes resoluciones. 19.a) muestra un espacio de rejilla de un minuto de arco. La figura 19.b) corresponde datos de batimetría para un espaciado de cuadrícula de 30 segundos de arco.	47
Figura 20. Modelo de Batimetría y Topografía combinado en la costa de Pochomil.	48

## Índice de Gráfico

Gráfico 1. Diagrama de tipo circular de la ocurrencia histórica de tsunamis dependiendo del tipo de fuente de tsunami tal como es clasificados en la base de datos NTL / ICMMG. Fuente: (NTL / ICMMG, s.f.). _____	22
Gráfico 2. Gráfico tipo circular de la caracterización de edificaciones en la costa de Pochomil. _____	50
Gráfico 3. Gráfico de barra que representa la caracterización de la población de Pochomil. _____	54
Gráfico 4. Propagación del tsunami con planos de falla, Inversa, normal y lateral. (Dip =9.6°). _____	59
Gráfico 5. Propagación del tsunami con plano de falla Inversa, Lateral, Normal (Dip=80.8°). _____	62
Gráfico 6. Comparación de la propagación de tsunami de las fuentes: USGS, GCTM, Tanioka. (M <sub>w</sub> 7.7, Depth 10 km). _____	65
Gráfico 7. Propagación de la ola con 7.7 M <sub>w</sub> , Depth 10 km (15 GPa y 30 GPa). _____	68
Gráfico 8. Propagación de la ola con 7.7 M <sub>w</sub> , Depth 40 km (15 GPa y 30 GPa). _____	69
Gráfico 9. Propagación de la ola con 8.0 M <sub>w</sub> , Depth 10 km (15Gpa y 30 GPa). _____	71
Gráfico 10. Propagación de la ola con 8.0 M <sub>w</sub> , Depth 40 km (15 GPa y 30 GPa). _____	72

## Índice de Fotos

Foto 1. Daños causados por el sismo de 1992 que origino un tsunami en las costas de Nicaragua (INETER).	16
Foto 2. Caracterización de las edificaciones: a) Buena b) Muy buena c) Frágil d) Muy frágil.	53
Foto 3. Edificación considerada en estado Buena.	94
Foto 4. Escuela El Madroñal.	94
Foto 5. Edificación Muy frágil.	95
Foto 6. Muestra una talud y sobre ella edificaciones clasificadas Muy buena.	95
Foto 7. Bares y restaurantes en la costa de Pochomil.	96
Foto 8. Sistema de Alerta Temprana en caso de tsunami.	96
Foto 9. Actividades de preparación en caso de tsunami en la costa de Pochomil, 19-03-20.	97
Foto 10. EJERCICIO NACIONAL DE PREPARACIÓN Y PROTECCIÓN DE LA VIDA EN SITUACIONES DE MULTIAMENAZA, 1-10-20. Realizado en Masachapa.	98

## Índice de Tabla

Tabla 1. Planos nodales para el sismo de 1992 frente a Nicaragua CMT. _____	15
Tabla 2. Planos nodales para el sismo de 1992 frente a Nicaragua USGS. _____	15
Tabla 3. Escala de intensidad de tsunamis según (Papadopoulos & Imamura, 2001). ____	27
Tabla 4. Se muestra las coordenadas computacionales, el epicentro para el modelaje de propagación de la ola frente la costa de Pochomil, y las coordenadas correspondiente a los puntos de control para conocer la altura de la ola en la zona de interés ubicado a 50 m de profundidad (H). _____	55
Tabla 5. Parametros geofisicos y planos de falla, inversa, normal y lateral con Dip = 9.6°. _____	57
Tabla 6. Parámetros de entrada para el programa TUNAMI-N2 Code. _____	58
Tabla 7 Parámetros geofisicos y planos de falla, inversa, normal y lateral con Dip=80°. _____	60
Tabla 8. Parámetros de entrada para el programa TUNAMI-N2 Code. _____	61
Tabla 9. Parámetros geofísicos y plano de falla inversa. _____	63
Tabla 10. Parámetros Geofísicos de las fuentes: USGS, GCTM, Tanioka. _____	64
Tabla 11. Parámetros para escenarios de propagación del tsunami. Por cada magnitud se varía la profundidad y la rigidez. _____	66
Tabla 12. Parámetros de entrada al software TUNAMI-N2 Code para un sismo de 7.7 M <sub>w</sub> para profundidades de 10 km y 40 km, con rigidez de 15 GPa y 30 GPa. _____	67
Tabla 13. Parámetros de entrada al software para un sismo de 8.0 M <sub>w</sub> para profundidades de 10 km y 40 km, con rigidez de 15 GPa y 30 GPa. _____	70
Tabla 14. Coordenadas computacionales de las regiones R1, R2, R3. _____	73

## Índice de Mapas

Mapa 1. Soluciones de tensor de momento en los alrededores de Nicaragua. Los datos es desde 1990 hasta ahora (catálogo IRIS y catálogo de boletines INETER) para terremotos de magnitud superior a 7.0. Terremoto de El Limón de 1991 (A), Terremoto de Nicaragua de 1992 (B), terremoto de El Salvador de 2001 (C), Terremoto de Astillero de 2004 (D), el terremoto de El Salvador-Nicaragua de 2012 (E), el terremoto de Cosigüina de 2014 (F). La línea sólida roja indica los límites tectónicos entre la placa Cocos (CO), la placa del Caribe (CA) y Placa norteamericana (NA). Los cuadrados naranjas representan terremotos que provocaron tsunamis. Los cuadrados negros representan el terremoto del interior que hizo no provocar tsunamis. Los cuadrados azules representan el terremoto en el mar que no provocó tsunamis. _____	14
Mapa 2. Momento tensor para el sismo de 1992 cerca de costa de Nicaragua IRIS. _____	15
Mapa 3: Mapa de localización del área de estudio. _____	44
Mapa 4. Caracterización de las edificaciones de la costa de Pochomil de acuerdo al tipo de construcción. _____	52
Mapa 5: Mapa de fuente sísmica. (Epicentro del sismo para la simulación de tsunami frente la costa de Pochomil). _____	56
Mapa 6. Regiones de batimetría que muestra los dominios computacionales hasta llegar a R3 que esta combinado con la topografía del área de estudio. _____	74
Mapa 7. Mapa de Pochomil y el área inundada para un sismo de magnitud 7.7 $M_w$ . _____	75
Mapa 8. Mapa de Pochomil y el área inundada para un sismo máximo creíble de magnitud 8.0 $M_w$ . _____	77
Mapa 9. Mapa de amenaza por inundación debido a tsunami en la costa de Pochomil _____	81
Mapa 10. Índice de vegetación para la zona costera de Pochomil. _____	82

## **Dedicatoria**

*A Dios, mis padres y las personas que han estado en los momentos más difíciles y emotivos de este transcurso.*

## **Agradecimientos**

*A Dios, mi familia y a mis amigos que de corazón se lo hice saber en persona.*

## Resumen

El presente estudio muestra la evaluación de la amenaza ante una inundación generada por tsunami en la costa de Pochomil, en el cual se retomaron como referencia los mismos parámetros geofísicos del sismo ocurrido en 1992 frente a las costas de León, y ubicando el epicentro frente a la costra de Pochomil. Para la modelación de los escenarios de propagación se utilizó el software TUNAMI-N2 Code modificado por Yanagisawa,( 2018), para diferentes planos de falla: inversa, normal y lateral; como generadores del eventos sísmico calculado por distintas fuentes como la USGS, GCMT, y Tanioka et al.; 2017, con magnitud 7.7  $M_w$ . Además, se varió la profundidad, la rigidez (GPa) y adicionando una magnitud de 8.0  $M_w$  como escenario máximo creíble.

Con los parámetros de falla que generan mayor altura de la ola se realizó 2 escenarios de inundación con magnitud 7.7  $M_w$  y 8.0  $M_w$  para estimar las posibles áreas inundadas en la costa de interés. Finalmente se caracterizaron los elementos expuestos, como edificaciones y población en general, para brindar recomendaciones que apoyen los planes de mitigación en Pochomil en caso de ocurrencia de tsunamis.

Palabras claves: Tsunami, inundación, propagación, falla inversa.

# CAPITULO I

## Introducción

América Central es una zona de amenaza sísmica elevada, principalmente influida por la interacción de las placas del Coco y del Caribe en la zona de subducción del Pacífico (Cardona O, y otros, 2012), es por esa razón que nuestro país está expuesto a diferentes fenómenos de origen natural, como sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, movimientos en masas etc., Por consiguiente, las medidas de prevención incluyen la realización de estudios, evaluar y cuantificar la amenaza.

El primer paso para la evaluación del riesgo, es el análisis de la peligrosidad o amenaza (Aguirre, Quiroga, Jara, & Medina, 2016), por ellos las iniciativas o estudios científicos que permita reducir las afectaciones debido a tsunamis son útiles. Como cualquier otra amenaza natural no pueden evitarse, es por eso que la realización de esta tesis tiene como finalidad apoyar los esfuerzos de mitigación a través de las metodologías adquiridas de las comunidades científicas como los modelos sísmicos, utilizando software y sistemas de información geográfica, para establecer aproximaciones de las áreas susceptibles que podrían ser afectadas por inundaciones debido a tsunamis en la costa de Pochomil.

Los estudios de inundaciones por tsunami se pueden realizar con un enfoque en el que se modelen múltiples escenarios de propagación, considerando al menos dos escenarios de inundación, uno referente a la ocurrencia histórica y otro que enfoque el efecto de “máximo escenario creíble” para evaluar el impacto en las áreas bajo investigación.

Según la fuente de datos NGDC/NOAA, los movimientos sísmicos ocasionan el 75% de los tsunamis observados. Por consiguiente la investigación considera dos posibles tsunamis generados por un sismo falla inversa en la zona de Subducción del Pacífico, a 92 km de la costa, con una profundidad de 10 km, uno de magnitud

7.7  $M_w$  que corresponde al sismo de 1992, y el segundo de magnitud 8.0  $M_w$  como escenario máximo creíble. Estos modelos sísmicos permiten establecer las rutas de evacuación y las áreas fuera de peligro, proporcionando una herramienta que anticipa las repuestas a tomar en la ocurrencia de este desastre natural, disminuyendo las posibles pérdidas de vidas humanas.

## CAPITULO II

### Planteamiento del problema

El desplazamiento constante de las placas tectónicas y su interacción en las zonas de subducción, hace que la amenaza por tsunami se manifieste de manera recurrente, con la misma frecuencia o probabilidad que los eventos sísmicos detonantes en la costa del Pacífico nicaragüense.

La costa de Pochomil es una zona expuesta a tsunamis, la evidencia de ello es el tsunami ocurrido en 1992 frente a la costa de León., Según el Catálogo global de CMT <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>, fue generado en la zona de subducción, con una profundidad aproximadamente de 15 km y magnitud 7.6  $M_w$ , con parámetros del bloque de la falla: strike = 122°, dip = 78° slip = 90°, ocasiono cuantiosas pérdidas de vida humanas por la altura del tsunami que en promedio fue de 4 m y en algunas costas como Corinto y el Tránsito estimaron 10 m la altura de ola, por lo tanto es evidente el grado de amenaza en que se encuentran la población que habita la costa de Pochomil a ello se suma el desarrollo urbano y poblacional.

El Sistema Nacional para la Prevención, Mitigación y Atención de Desastres (SINAPRED) dispone de 60 sirenas automáticas 24/7 a lo largo del Costa del Pacífico y un sistema de radio de voz digital que llega a las costas, también cuentan con mapas de vulnerabilidad y Amenazas (multiamenazas) de manera general de toda las costas del pacifico, pero se debe tomar en consideración que cada zona difiere en densidad poblacional.

## CAPITULO III

### Justificación

Las inundaciones que generan los tsunamis producto de terremotos interplaca, en la zona de subducción del Pacífico pueden causar trágicas pérdidas de vidas y grandes daños materiales en las comunidades costeras. Actualmente la costa de Pochomil, es una zona de total interés, pues se encuentra en desarrollo socioeconómico, por tales razones se necesitan mapas detallados de futuras inundaciones causadas por tsunamis, para delinear las rutas de evacuación y la planificación a largo plazo en esta área.

La red sísmica del país fue fortalecido después del tsunami que afectó la costa del Pacífico de Nicaragua en septiembre 1992, y en paralelo, se implementó el Sistema de Alerta Temprana de Tsunami (INETER, 1992; <https://web-geofisica.ineter.gob.ni/tsunami/tsu-nic92.html>). No obstante, es de suma importancia contribuir con estudios que apoyan el desarrollo científico del país.

Este estudio es local, pero es complementaria a otra investigación para distintas costas de nuestro país. Con el creciente progreso turístico y urbanístico en las zonas costeras de nuestro país, las cuales son unas de las principales fuentes de ingreso económico, principalmente en Pochomil, los resultados del presente estudio, proporcionan información que permite mejorar las actividades de desarrollo ya existentes, y que reafirman la importancia de inversión para sistemas avanzados de alerta que comuniquen a la población de posibles tsunamis.

## **CAPITULO IV**

### **Objetivos**

#### **4.1. Objetivo General**

- Evaluar la amenaza por inundación debido a tsunamis en la costa de Pochomil.

#### **4.2. Objetivo Específico**

- Modelar distintos planos de fallas para dos tipos magnitudes de 7.7  $M_w$  y 8.0  $M_w$  que tenga el potencial de generar tsunami he inundaciones frente a las costa de Pochomil.
- Construir un mapa de amenaza de inundaciones para la costa de Pochomil.
- Caracterizar las estructuras en zona urbanística de Pochomil en caso de inundación.
- Valorar medidas de mitigación en caso de inundación debido a tsunami en la costa de Pochomil.

## CAPITULO V

### Antecedentes

A raíz del terremoto ocurrido frente a las costas del Pacífico de Nicaragua, que originó un tsunami y afectó las costas de León, en septiembre 1992, se han realizado diferentes estudios acerca de los parámetros físicos y modelaciones de este tsunami particular.

- ✓ En el estudio realizado por Tanioka, Grillo, & Argüello, (2019) realizan un método de pronóstico de inundación de tsunami de campo cercano (NearTIF) para la costa del Pacífico de América Central, se desarrolló sobre la base del caso del terremoto de tsunami de Nicaragua en 1992. El modelo fuente apropiado del terremoto de Nicaragua de 1992, estimado utilizando la inversión de la fase W con una curva de rigidez dependiente de la profundidad de un estudio anterior, se utiliza como modelo de referencia para probar el método NearTIF propuesto.
- ✓ En la investigación de Argüello, (2016), realizó modelos numéricos de ejecución para el terremoto de Nicaragua de 1992 y el terremoto de El Salvador-Nicaragua 2012, en el cual obtuvo resultados de la altura máxima similar del tsunami y hora de llegada en los indicadores de marea supuestos.
- ✓ Otro caso es el estudio realizado por Borrero, y otros, (2014), modelan la propagación del tsunami e inundación, para el terremoto del 27 de agosto de 2012, en altamar, El Salvador y Nicaragua, donde los resultados coincidió con las medidas de las alturas del tsunami en El Salvador. Sin embargo, no parece proyectar la energía suficiente hacia Nicaragua para explicar los efectos que el tsunami produjo en esta región
- ✓ En el estudio científico realizado por Satake, (1994) del departamento de Ciencias Geológicas de la universidad de Michigan, Estados Unidos, hace cálculos numéricos de tsunami a lo largo de la costa nicaragüense utilizando

ecuaciones lineales de aguas poco profunda, en el cual se produjeron formas de ondas de tsunami en puntos de la red costera así como estaciones de mediación de mareas para comparar los datos.

- ✓ La Dirección y Coordinación de Grupos de Trabajo Técnico – Consorcio ERN América Latina, realizó un estudio que consiste en evaluar la amenaza por tsunami en la región de Miramar y expresar el resultado en términos de zonas probables de inundación y tirante de agua. El análisis se realiza en términos probabilistas de manera tal que se toman en cuenta los aportes de todas fuentes sísmicas generadoras de tsunamis. Los resultados de la simulación se presentan de manera que puedan ser usados para análisis detallados y como insumos para estudios de factibilidad de construcción de infraestructura en la región (Cardona, y otros, 2008).

# CAPITULO VI

## Marco tectónico

### 6.1. Estudio de la Sismología en el campo de la Geofísica

La Geofísica es un área de investigación que agrupa diferentes disciplinas encargadas del estudio de la Tierra, desde el punto de vista de la física. Comprende todo lo relacionado con su estructura, morfología, evolución y dinámica. Dentro de la cual se encuentra la Sismología (Figura 1), que se encarga de estudiar los sismos y sus fenómenos conexos, la generación, propagación y registro de las ondas elásticas en la Tierra, y de las fuentes que las producen. Es a partir del estudio de la propagación de las ondas sísmicas en el interior de la Tierra, que ha permitido revelar la estructura en su interior, estimar densidades y constantes elásticas, e identificar los procesos dinámicos activos que suceden constantemente en ella.

De acuerdo a la nomenclatura internacional de la UNESCO para los campos de la ciencia y tecnología. La Geofísica comprende las siguientes áreas, Figura 1.

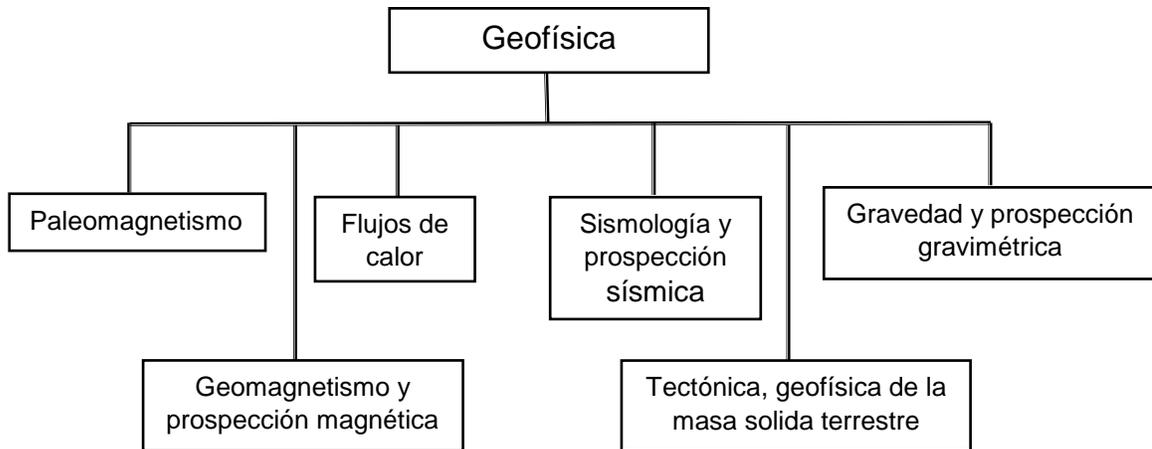


Figura 1. División de la Geofísica para los campos de la ciencia y tecnología (UNESCO, 2004).

## 6.2 Tectónica de placas en Nicaragua

Nicaragua se ubica en el borde Oeste de la placa del Caribe, y sus volcanes forman parte del Anillo de Fuego Circum Pacífico. Los rasgos tectónicos dominantes en Nicaragua son: La Fosa Mesoamericana, El Graben Nicaragüense (Segura F, 2013). Siendo la colisión de las placas Coco y Caribe el mecanismo que mantiene activo el sistema tectónico, ver Figura 2.

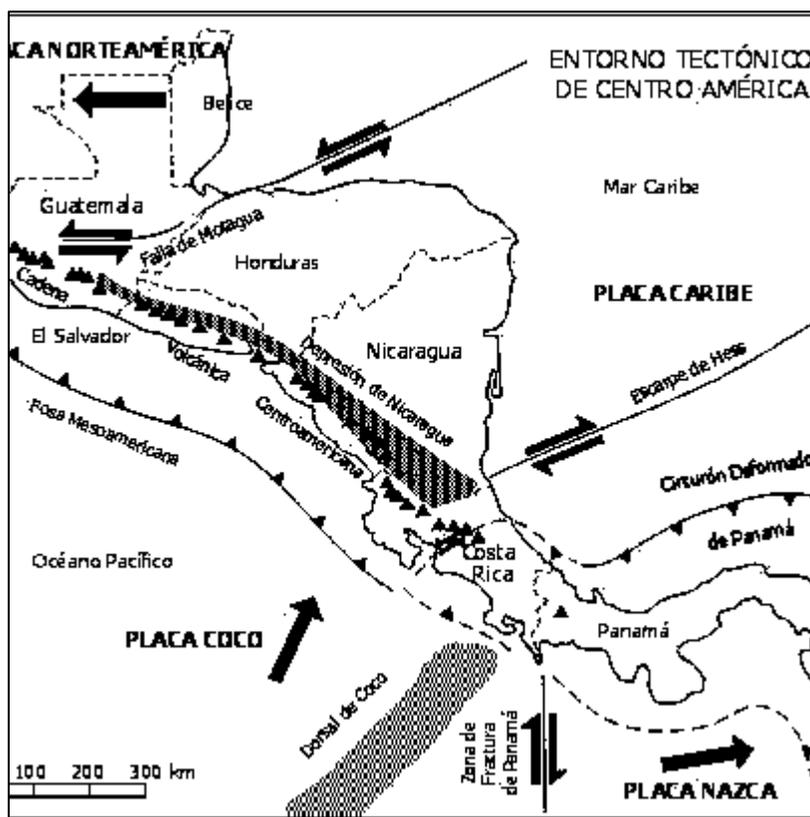


Figura 2. Tectónica regional de América Central (Harlow & White, 1985).

## 6.3. La Depresión de Nicaragua

Consiste en un graben cuaternario elongado, que está en la región trasarco y se extiende subparalelo a la costa Pacífica desde El Salvador hasta el norte de Costa

Rica. La cuenca se ensancha desde 40 km en El Salvador, hasta 75 km en el sureste de Nicaragua. Cerca de Managua la depresión tiene 50 km de ancho y está ocupada por los lagos de Managua y Nicaragua, la zona de Wadatti-Benniof bajo el arco volcánico de América Central buza hacia el NE, con ángulos en el rango  $60^{\circ} - 80^{\circ}$ , y con sismos hasta una profundidad de 200 km (Molina, y otros, 2008).

#### 6.4. Fosa Mesoamericana

Esta Zona de Subducción se extiende a lo largo de la costa Pacífica de América Central, el proceso de penetración de la placa Caribe a razón aproximada de 5 a 7 cm / año (Minster & Jordan, 1978), ver Figura 3. La placa Coco se subduce bajo la placa Caribe con un ángulo inicial de  $7^{\circ}$  (shipley & Moore, 1990), el cual se incrementa al aumentar la profundidad desde la Fosa hasta el límite inferior del límite interplaca que se localiza aproximadamente a 60 y 80 km. Los temblores interplaca ocurren a profundidades entre 15 y 50 km, dependiendo de la lejanía de la Fosa. Las magnitudes máximas varían en diferentes segmentos del borde del Pacífico de Nicaragua (Segura & Rojas, 1987).



Figura 3. Subducción de placa Coco bajo la placa Caribe (OVCICORI UNA).

### **6.5. Zona intraplaca del Pacífico de Nicaragua**

Esta zona es una de las más activas en Nicaragua y se encuentra influenciada por la actividad volcánica de la cordillera de los Maribios. En esta zona han ocurrido importantes sismos que han causado efectos significativos a la población nicaragüense. Los sismos en esta zona se encuentran asociados a mecanismos de fallamiento inverso. Sin embargo en algunos casos se han definido con mecanismos de rumbo en la parte somera (Segura, 2008). La mayoría de los terremotos intraplaca registrados, cuya profundidad está comprendida entre 50 km y 280 km, han ocurrido con epicentro entre El Salvador y Nicaragua (Güendel & Protti, 1998).

### **6.6. Interpolaba Sureste del Pacífico nicaragüense**

Comprende en planta la región de Masachapa en Nicaragua y Papagayo en Costa Rica y subduce hacia el NE con un ángulo de 45° hasta los 60 km de profundidad. Se ubica entre las zonas sísmicas del Golfo de Fonseca (en Nicaragua) y la de Nicoya en Costa Rica. Los terremotos históricos de mayor magnitud que se han registrado en esta fuente ocurrieron el 27 de febrero de 1916 ( $M_s$  7.5) y el 2 de septiembre de 1992, de 7.6  $M_w$  que generó un tsunami. Morales (1985) definió el límite SE como el segmento adyacente con el área de ruptura del primer terremoto.

Güendel & Protti, (1998), muestra que para la zona comprendida a lo largo de la Zona de Subducción de Nicaragua, la orientación los esfuerzos comprensivos muestran una dirección predominante N 30°- 40°E. Según Molina, y otros, (2008) por las características tectónicas y geométricas, podrían esperarse eventos máximos de 7.8  $M_w$ .

## 6.7. Amenaza sísmica en Nicaragua

La sismicidad de Nicaragua responde a cuatro fuentes generadoras de sismos con diferencias sustanciales en cantidad de sismos, rango de profundidad de la fuente y variables que las caracterizan, estas fuentes son: Zona de Subducción, Zona Ante arco, Zona del Arco, y Zona Tras Arco, ver figura 4.

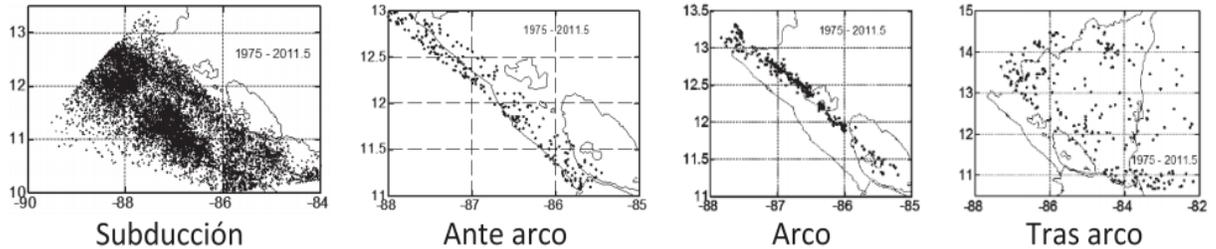
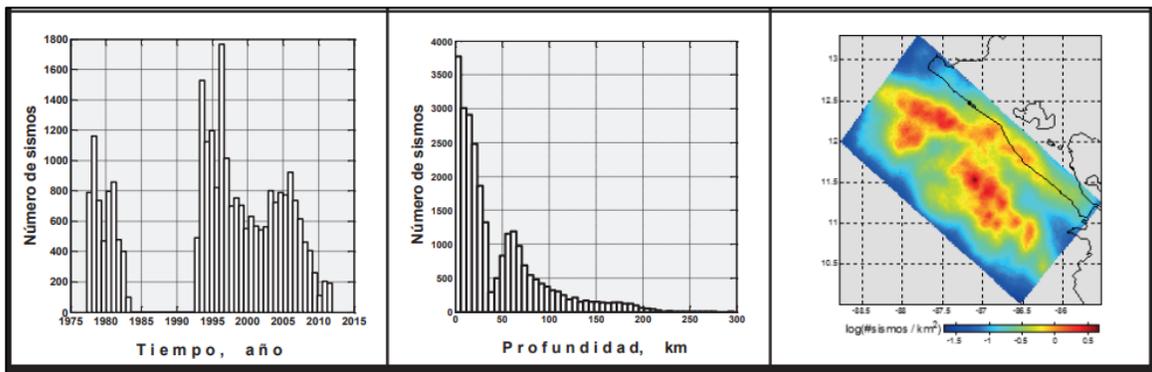


Figura 4. Fuentes sísmicas que se distinguen en Nicaragua con base a características de cantidad de producción de sismos, rango de profundidad de los focos, sismos extremos (Segura, 2016).

La Zona de Subducción es la fuente de mayor producción de sismos; más del 90% de los sismos que registra la red sísmica local de Nicaragua proceden de este sector, que cubre 120 km mar adentro, aproximadamente, y una franja costera de 50 km, aproximadamente, desde el litoral del Pacífico hasta el arco volcánico (Segura, 2016), ver figura 5.



a)

b)

c)

Figura 5. a) Indica la cobertura temporal de la muestra sísmica para la zona de subducción. Después de 1980 la captación de datos decreció rápidamente coincidiendo con el recrudecimiento de los problemas socios políticos que vivió el país en los años inmediatos al triunfo de la Revolución Popular Sandinista. b) refleja que la mayor producción de sismos ocurre en la parte somera entre 0.0 y 40 km, que corresponde a la mayor flexión de la corteza en subducción e interacción entre las placas. Además la generación de sismos es menor de los 300 km lo cual significa que frente a las costas de Nicaragua solo se producen sismos someros e intermedios. c) muestra la densidad sísmica (Wiemer y Zuniga 1994; Wiemer 2001), las partes rojas reflejan las zonas de mayor producción de sismos descendiendo hacia azul con menor producción.

Los eventos interplaca en la Zona de Subducción que contribuyen a la amenaza sísmica en Nicaragua se distribuyen en tres fuentes sísmicas: *Zona Sísmica del Golfo de Fonseca, Zona Sísmica de Masachapa, Zona Sísmica de Papagayo.*

#### **6.7.1. Zona Sísmica del Golfo de Fonseca**

Se extiende desde el extremo de la costa noroccidental del país hasta la costa del Pacífico central de El Salvador, es la parte de subducción somera, históricamente el evento máximo reportado en esta zona sísmica es uno en 1921 frente al Realejo de Magnitud 7.3  $M_w$  (Leeds, 1974).

#### **6.7.2. Zona Sísmica de Masachapa**

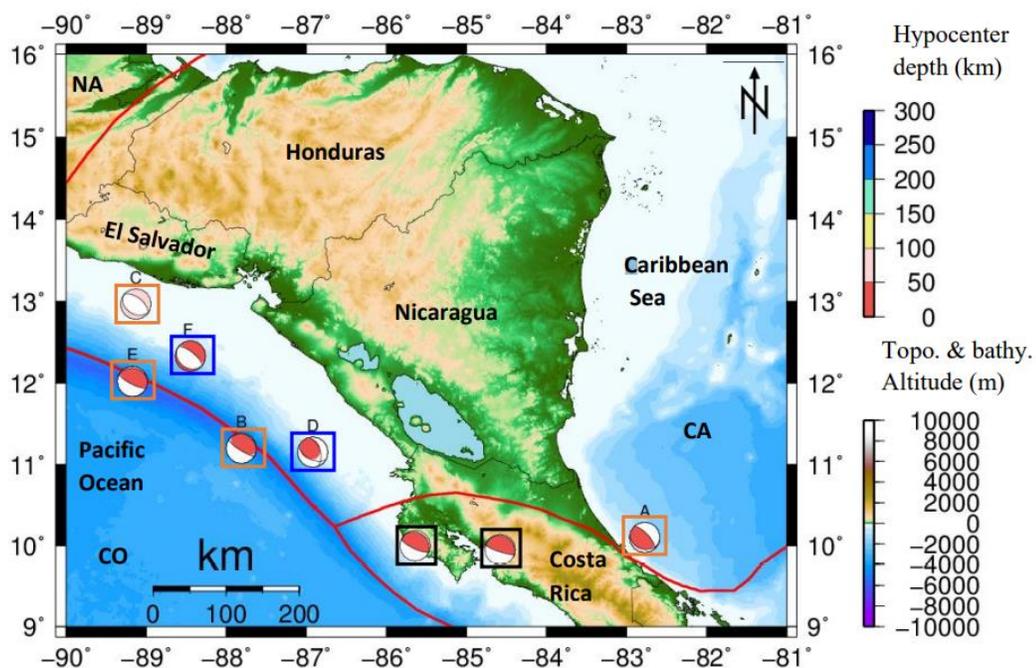
Según Rojas (1993), comprende la zona de subducción somera frente a la costa del Pacífico central de Nicaragua; esta limitada por la zona sísmica de Papagayo y Golfo de Fonseca. Es una fuente sísmica capaz de generar eventos de magnitud del orden de los 7.5  $M_w$ , es una importante fuente sísmogeneradora de tsunamis, se caracteriza por periodos de recurrencia del orden de 35 años. El sismo más reciente ocurrido en esta zona fue en septiembre de 1992  $M_w$ , frente a León.

#### **6.7.3. Zona Sísmica de Papagayo**

Los temblores en esta zona se localizan bajo el piso oceánico a partir de una profundidad de unos 10 km, hasta alcanzar profundidades máximas del orden de 50 km bajo el antearco noroeste de Costa Rica (Península de Santa Elena). Para esta zona, las magnitudes máximas oscilan entre 7.2 y 7.6. En esta fuente sísmica, los temblores de mayor magnitud ocurridos en el presente siglo fueron los del 27 de febrero de 1916 (Tristan, 1916), y el del 03 de marzo de 1990.

En relación a la recurrencia de terremotos han determinado que conjuntamente estas tres zonas sísmicas de la costa Pacífica de Nicaragua, se caracterizan por la ocurrencia de ciclos sísmicos cada 20 a 40 años. Con lo anterior planteado es evidente la sísmicidad en la Zona de Subducción frente a las costas del Pacífico nicaragüense, como dato relevante según el Boletín anual Sismológico, Vulcanológico y Geológico, en el año 2019, de 1,093 sismos ocurridos en Nicaragua, el 88% se registró en la Zona de Subducción, el 8% de la sísmicidad se ubicó en la Cadena Volcánica y el 4 de la sísmicidad ocurrió en Zona Norte, Central y Caribe, todo lo anterior confirma el peligro sísmico del Pacífico de Nicaragua.

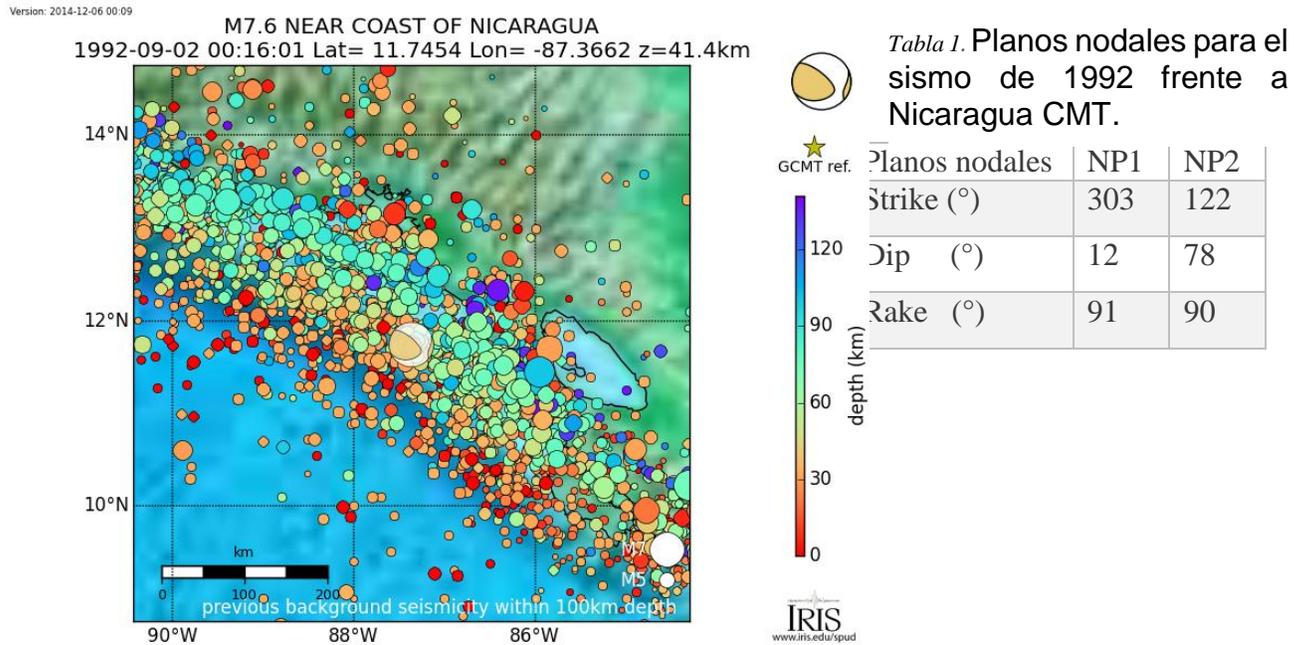
A continuación en el Mapa 1, se muestra los sismos más grandes ocurridos cerca de Nicaragua en la zona de subducción, catalogados en IRIS y el catálogo de boletines de INETER.



Mapa 1. Soluciones de tensor de momento en los alrededores de Nicaragua. Los datos es desde 1990 hasta ahora (catálogo IRIS y catálogo de boletines INETER) para terremotos de magnitud superior a 7.0. Terremoto de El Limón de 1991 (A), Terremoto de Nicaragua de 1992 (B), terremoto de El Salvador de 2001 (C), Terremoto de Astillero de 2004 (D), el terremoto de El Salvador-Nicaragua de 2012 (E), el terremoto de Cosigüina de 2014 (F). La línea sólida roja indica los límites tectónicos entre la placa Cocos (CO), la placa del Caribe (CA) y Placa norteamericana (NA). Los cuadrados naranjas representan terremotos que provocaron tsunamis. Los cuadrados negros representan el terremoto del interior que hizo no provocar tsunamis. Los cuadrados azules representan el terremoto en el mar que no provocó tsunamis.

#### 6.7.4. Sismo de 1992 frente a las costas del pacífico de Nicaragua

El sismo que ocasiono un tsunami devastador en la costa del Pacífico de nicaragüense fue el 2 de Septiembre de 1992, según el catálogo de IRIS fue registrado en la Zona de Subducción a 100 km de la costa de León y el epicentro a 15 km de profundidad, con una magnitud de 7.6  $M_w$ , ver Mapa 2.



Mapa 2. Momento tensor para el sismo de 1992 cerca de costa de Nicaragua IRIS.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) registro este sismo con magnitud de 7.7  $M_w$ , y a una profundidad de 11.5 km localizado a 76 km de la costa con los siguientes parámetros, ver Tabla 2.

Tabla 2. Planos nodales para el sismo de 1992 frente a Nicaragua USGS.

Planos nodales	NP1	NP2
Strike (°)	293	130
Dip (°)	12	79
Rake (°)	73	93

### 6.7.5. Efectos del Tsunami de 1992 frente a las costas del Pacífico de Nicaragua

Al menos 116 personas murieron, más de 68 desaparecieron y más de 13.500 quedaron sin hogar en Nicaragua. Alrededor de 1.300 casas y 185 barcos de pesca fueron destruidos a lo largo de la costa oeste de Nicaragua. Los daños totales en Nicaragua se estiman entre 20 y 30 millones de dólares estadounidenses, ver Foto 1.

El tsunami se extendió tierra adentro 1.000 metros en Masachapa, Nicaragua. Las alturas máximas de ola (en cm pico a valle) en las estaciones de mareas seleccionadas fueron las siguientes: 111 cm en Isla Baltra, 83 cm en Isla de Pascua, cm en Isla Socorro, 18 cm en La Libertad, Ecuador, 10 cm en Valparaíso, Chile y 10 cm en Hilo, Hawaii (USGS). El estudio de Satake (1993) mostró que para Nicaragua la altura promedio de la ola fue de 4 m, en algunas zonas llegó a alcanzar 7 m y 8 m, en El Transito alcanzó la máxima altura de 10 m.



Foto 1. Daños causados por el sismo de 1992 que originó un tsunami en las costas de Nicaragua (INETER).

## Marco Teórico

### 6.8. Definición de terremoto

Según Lana & Correig (1981) un terremoto es el resultado de un proceso tectónico mediante el cual se genera un campo de esfuerzos no hidrostáticos en una región finita. En un momento dado se produce una ruptura (un terremoto) según una falla, y la energía elástica almacenada en el campo de esfuerzos se reduce en la cantidad de energía radiada como ondas elásticas (sísmicas) y otros procesos no elásticos. Otro concepto inferido por Kanamori & Brodsky, (2004), consideran un terremoto como la liberación abrupta de la tensión acumulada en la corteza terrestre, como resultado del movimiento relativamente lento de las placas de la litósfera.

La región donde dos placas están en contacto se denomina frontera de placas, y la forma en que una placa se mueve con respecto a la otra determina el tipo de frontera. De separación: Si las placas se alejan una de la otra, de transformación: si las placas se están deslizando horizontalmente en direcciones opuestas, de subducción: si las placas se mueven convergentemente y una se está deslizando bajo la otra, ver Figura 6.

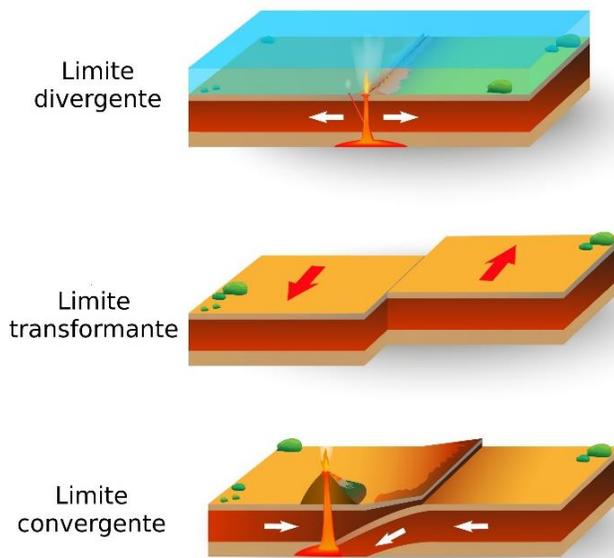


Figura 6. Fronteras de placas (Andrey, 2019).

El epicentro: Es el punto sobre la superficie de la tierra donde se registra el sismo.

El hipocentro: Es el punto subterráneo donde se origina el sismo. Ver figura 7.

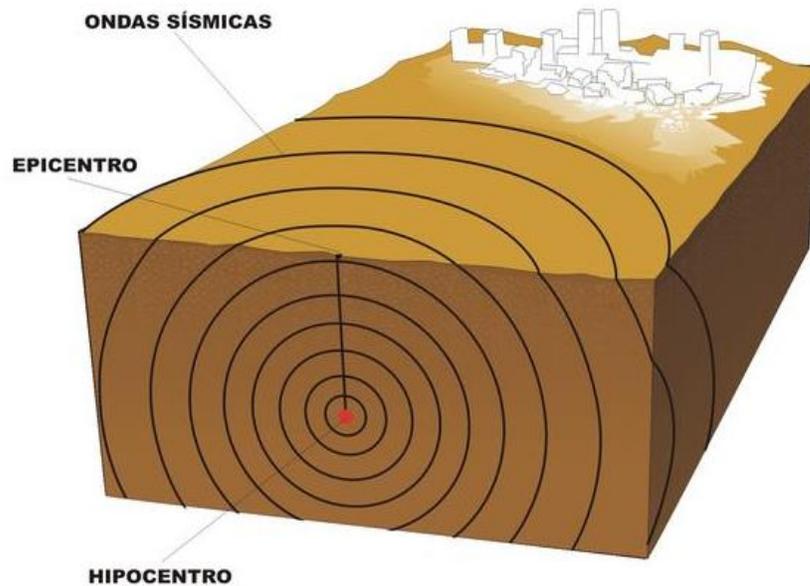


Figura 7. Hipocentro y epicentro de un sismo (UCE, 2010).

## 6.9. Magnitud de un sismo

La magnitud de un sismo es un número que busca caracterizar el tamaño de un sismo y la energía sísmica liberada. Se mide en una escala logarítmica, de tal forma que cada unidad de magnitud corresponde a un incremento de raíz cuadrada de 1000, o bien, de aproximadamente 32 veces la energía liberada. Es decir que, un sismo de magnitud 8  $M_w$  es 32 veces más grande que uno de magnitud 7  $M_w$ , 1000 veces más grande que uno de magnitud 6  $M_w$ , 32,000 veces más grande que uno de magnitud 5  $M_w$ , y así sucesivamente.

## 6.10. Mecanismo focal de un sismo

La solución del mecanismo focal de un sismo (MF) es el resultado del análisis de las formas de las ondas sísmicas generadas por un terremoto, registradas en una serie de estaciones sísmicas en forma de sismogramas.

La caracterización precisa del mecanismo focal de un terremoto proporciona información muy importante para los sismólogos y geólogos estructurales que trabajan en estructuras activas, su epicentro, profundidad de foco, la magnitud (una medida de la energía sísmica radiada por el terremoto), así como la orientación del posible plano de falla y su movimiento.

Freeman Gilbert (1970) propone expresar los desplazamientos producidos por un terremoto en términos del tensor momento sísmico. El tensor momento sísmico tiene seis componentes independientes, en las cuales el momento angular para fuerzas equivalentes en la fuente desaparece, el doble par de fuerzas es un caso especial del momento desviatorio, con la restricción que el determinante de  $M$ , es cero:

$$M = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{pmatrix} \quad M = \begin{pmatrix} M_0 & 0 & 0 \\ 0 & -M_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 1}$$

Para un doble par de fuerzas, las componentes cartesianas del tensor momento pueden expresarse en términos de rumbo ( $\Phi$ ), buzamiento ( $\delta$ ) y deslizamiento ( $\lambda$ ) de la cizalla (plano de falla) y el momento sísmico escalar  $M_0$ . (Aki & Richards, 1980):

$$M_{xx} = -M_0 (\text{sen}\delta \text{cos}\lambda \text{sen}2\Phi + \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}2\Phi) \quad \text{ec. 2}$$

$$M_{xy} = M_0 (\text{sen}\delta \text{cos}\lambda \text{cos}2\Phi + 0.5 \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}^2\Phi) \quad \text{ec. 3}$$

$$M_{xz} = -M_0 (\text{cos}\delta \text{cos}\lambda \text{cos}\Phi + \text{cos}2\delta \text{sen}\lambda \text{sen}2\Phi) \quad \text{ec. 4}$$

$$M_{yy} = M_0 (\text{sen}\delta \text{cos}\lambda \text{sen}2\Phi - \text{sen}2\delta \text{sen}\lambda \text{cos}^2\Phi) \quad \text{ec. 5}$$

$$M_{YZ} = -M_0(\cos\delta \cos\lambda \operatorname{sen}\Phi + \cos 2\delta \operatorname{sen}\lambda \cos\Phi) \quad \text{ec. 6}$$

$$M_{ZZ} = M_0 \operatorname{sen} 2\delta \operatorname{sen}\lambda \quad \text{ec. 7}$$

$$M_0 = \mu \cdot D \cdot A \quad \text{ec. 8}$$

En la cual  $\mu$  es la magnitud del módulo de corte de la corteza terrestre, D es el deslizamiento medio sobre la zona de ruptura de área  $A = L \cdot W$ .

A partir del momento sísmico es posible obtener la magnitud de momento, el cual es una escala de magnitud introducida por Kanamori, (1977) y Hanks & Kanamori, (1979), con el objetivo de evitar el problema de saturación para eventos sísmicos de larga duración. La magnitud de momento ( $M_w$ ) es una medida de la energía liberada por el sismo, está definido por:

$$M_w = \frac{2}{3} [\log_{10} M_0 - 9.1] \quad \text{ec. 9}$$

## 6.11. Concepto de Tsunami

La palabra tsunami se origina de una combinación de dos kanjis japoneses, que se traducen juntos como “ola en el puerto”. Este término ha sido adoptado por la literatura científica (González, 2011).

Físicamente un tsunami es una serie de ondas gravitacionales de período largo y de longitudes de ondas extremadamente largas que se propagan cerca de la superficie del océano, generadas por una perturbación que desplaza grandes cantidades de volúmenes de agua, ver Figura 8.

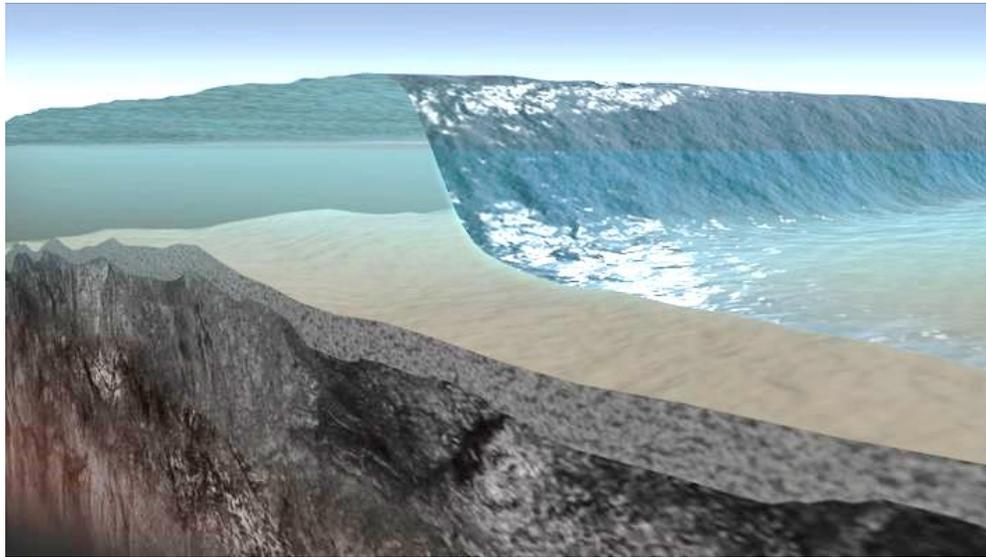


Figura 8. Representación de una ola de tsunami (Fernández, 2017).

Los tsunamis pueden ser generados por diferentes fuentes, pero la mayoría tsunamis, más grandes, han sido el resultado de terremotos por fallas inversas. Estos terremotos generadores de tsunamis se originan principalmente en zonas de Subducción, donde las placas tectónicas chocan y una es forzada a subducir bajo la otra.

### **6.12. Causas de los Tsunamis**

Entre los posibles eventos tsunamisgénicos se encuentran varios tipos de terremotos, erupciones volcánicas, los deslizamientos de masas de tierra submarinos, los impactos de meteoritos y otros aún desconocidos. En el Gráfico 1 se presenta la ocurrencia histórica de tsunamis dependiendo del tipo de fuente de tsunami.

### Causas de Tsunami

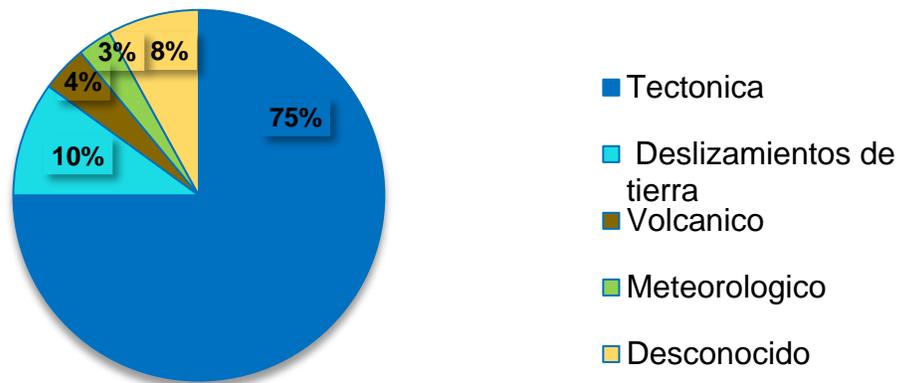


Gráfico 1. Diagrama de tipo circular de la ocurrencia histórica de tsunamis dependiendo del tipo de fuente de tsunami tal como es clasificados en la base de datos NTL / ICMMG. Fuente: (NTL / ICMMG, s.f.).

En la gran mayoría de los casos, el movimiento inicial que provoca la generación de los tsunamis es una dislocación vertical de la corteza terrestre en el fondo del océano, ocasionada por un sismo (CENAPRED, 2005).

### 6.13. Terremoto que generan Tsunamis

Los tsunamis que son producidos por terremotos, se originan por una repentina liberación de la energía acumulada en cientos de años por los movimientos muy lentos y casi imperceptibles de las placas tectónicas.

La corteza terrestre está formada por un pequeño número de placas litosféricas, de 70 a 250 km de espesor, que flotan sobre una capa subyacente de naturaleza viscosa, llamada astenósfera, ver Figura 9.

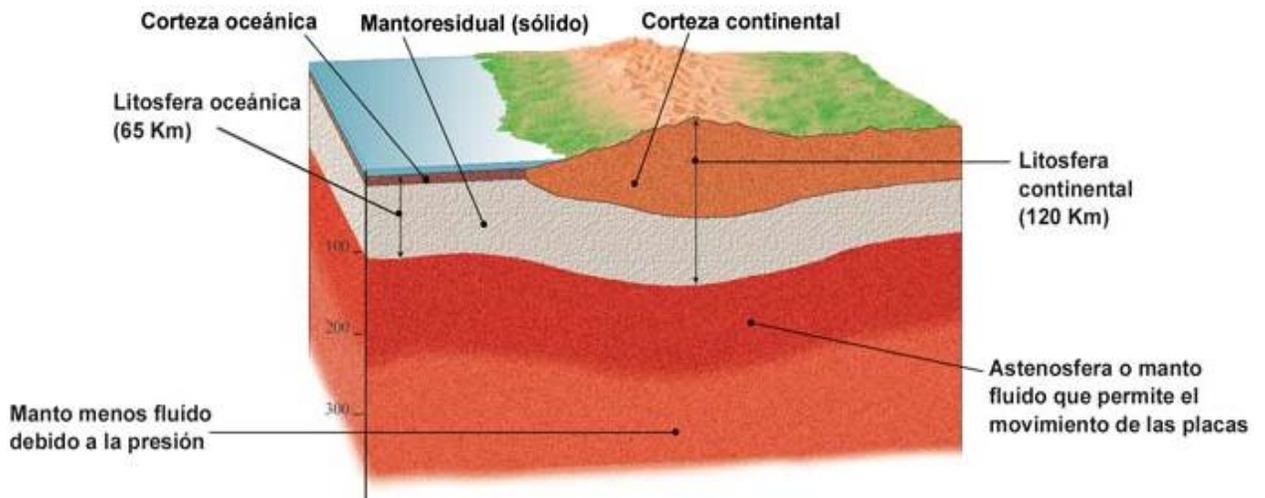


Figura 9. Litosfera oceánica y Corteza continental (Mallen, 2015).

Como no todos los terremotos generan tsunamis, para que un sismo tenga potencial tsunamigénico, parte de su zona de ruptura debe quedar bajo la superficie del océano (a menos de 70 km), y debe presentar un deslizamiento vertical suficiente (Aránguiz, y otros, 2014); el terremoto debe tener una magnitud superior a los 6.5 en escala de Richter y debe crear un movimiento vertical, del piso oceánico sobre una extensa área (de hasta cien mil kilómetros cuadrados), ver Figura 10.

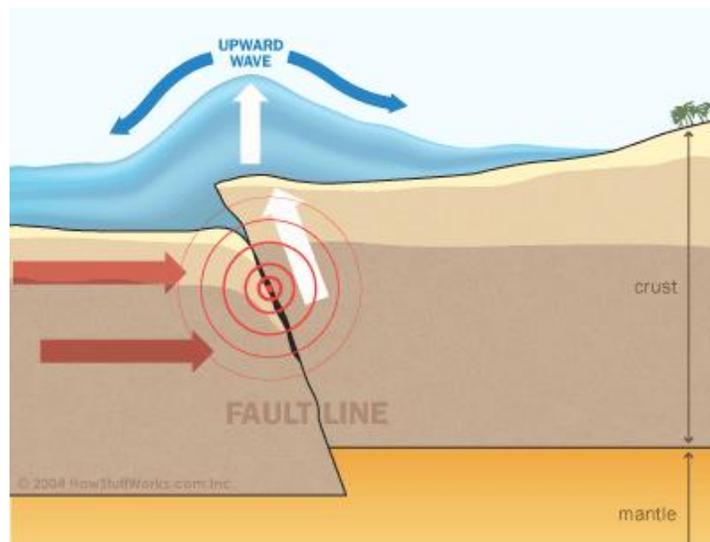


Figura 10. Generación de tsunami por falla inversa. Movimiento de placa en zona de subducción (Espín, 2012).

La orientación del movimiento de la falla está dado por tres ángulos:  $\Phi$ ,  $\delta$ , y  $\lambda$  este determina el mecanismo de falla del sismo:

Si  $\lambda = -90^\circ$  es una falla normal, Figura 11.a.

Si  $\lambda = 90^\circ$  es una falla inversa, Figura 11.b.

Si  $\lambda = 0^\circ$  ó  $\lambda = 180^\circ$  es una falla lateral, Figura 11.c.

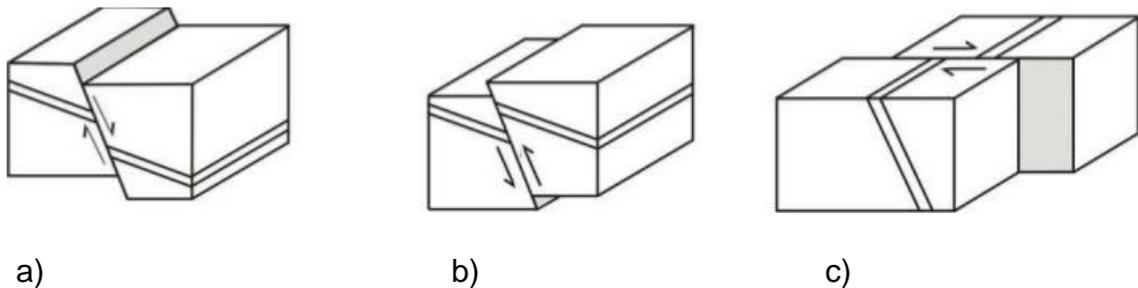


Figura 11. a) Falla normal b) Falla Inversa c) Falla lateral (Niemeyer, 1999).

Cuando la tensión acumulada excede la fuerza de fricción de la falla se produce un súbito deslizamiento de una placa sobre la otra generando así un terremoto, de esta manera, la caracterización del evento sísmico queda definida por los siguientes parámetros, (Aki & Richards, 2002). Ver Figura 12:

- ↗ El azimut ( $\Phi$ ),
- ↗ Rumbo o strike, como el ángulo de orientación del plano de falla respecto al norte medido en sentido horario ( $0^\circ \leq \Phi \leq 360^\circ$ ).
- ↗ El buzamiento o dip ( $\delta$ ) es el ángulo entre la horizontal y el plano de la falla comprendido entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .
- ↗ El ángulo de deslizamiento ( $\lambda$ ) o rake, es el ángulo que hace el vector de deslizamiento con el azimut.

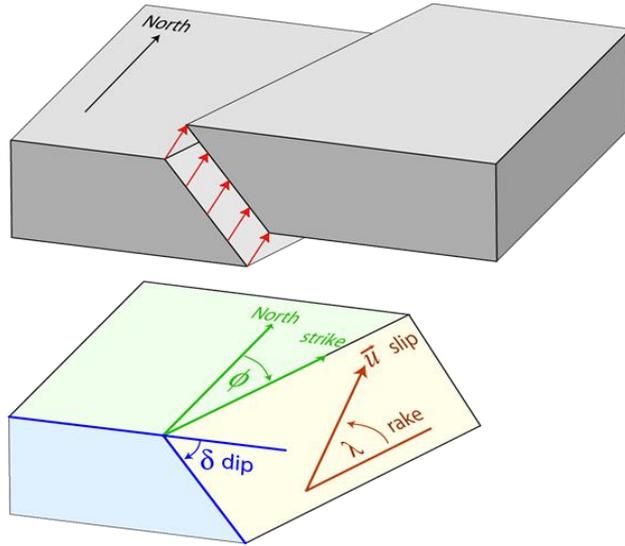


Figura 12. Definición de ángulos Strike, Dip y Rake para una modelo de falla (Wilkerson, 2019).

### 6.14. Magnitud del tsunami

La magnitud de un tsunami  $M_t$  se aplica para estimar de forma preliminar la altura del tsunami. Históricamente, la primera escala propuesta para medir un tsunami fue la escala Sieberg (1927). Era una escala de intensidad descriptiva, basada en el efecto destructivo de un tsunami, que constaba solo para cuatro grados de intensidad y no incluía ninguna medida cuantitativa de la altura de la ola del tsunami.

Ambraseys (1962) modificó ligeramente la escala de intensidad, de 4 a 6 grados, al dividir el grado superior en tres grados adicionales. Esta escala de 6 grados fue utilizada principalmente para la cuantificación de los tsunamis del Mediterráneo. Aunque ambas escalas son basadas únicamente en los efectos de tsunami locales en la costa, desde el principio se utilizaron para caracterizar el tamaño general del tsunami (es decir, como escalas de magnitud) mediante la asignación a un evento tsunamigénico su máxima intensidad observada en la costa.

Otra escala para la cuantificación de tsunamis se introdujo en 1942 en Japón (Imamura, 1942). Esta escala también era descriptiva, constaba de cinco grados (0 a 4) Posteriormente, K. Lida (1963) modificó esta escala agregando un grado adicional ( $m = -1$ ) para la caracterización de tsunamis débiles.

También fue el primero en conectar directamente el número de grado  $m$  con un valor de aceleración máximo observado en la costa  $H_{max}$  por la fórmula:

$$m = \log_2 H_{max} \quad \text{ec. 10}$$

Esta escala de intensidad llamada Imamura-Lida se usó ampliamente para catalogar tsunamis históricos del Pacífico y como escala de magnitud, para la cuantificación general de los eventos tsunamigénicos (en los catálogos este último, posiblemente se debe a observaciones reportadas del aumento costero del run-up en grandes tsunamis, pero solo un máximo valor run-up).

Una nueva escala de intensidad de grado 12 fue propuesta por Papadopoulos e Imamura (2001) para cuantificar efectos del tsunami en la costa. Ellos elaboraron una descripción detallada de cada grado, basada en:

- ↗ Los efectos en los seres humanos.
- ↗ Los efectos en los barcos y la naturaleza.
- ↗ Los daños a los edificios, sobre la base de los efectos dañinos bien documentados de los recientes tsunamis destructivos en el Pacífico.

A pesar de que no se utiliza ningún parámetro cuantitativo en la definición de cada grado, en su publicación original Papadopoulos e Imamura proporcionó una tabla (ver tabla 3) de posible correlación del número de grado ( $N^\circ$ ) y la escala (intensidad) con el número de grado (por tanto, con la altura de ejecución local) en la escala de Shuto definida. Esta correlación puede ser muy útil en la cuantificación de eventos históricos antiguos cuya descripción a menudo carece de elementos cuantitativos.

La nueva escala se hizo consistente con varias escalas de intensidad sísmica de 12 grados utilizadas en sismología para la cuantificación de los efectos de las sacudidas sísmicas, ver Tabla 3.

Tabla 3. Escala de intensidad de tsunamis según (Papadopoulos & Imamura, 2001).

N°	Intensidad	Descripción de los daños
<b>I</b>	No sentido	a) No se sintió incluso en las circunstancias más favorables. b) Ningún efecto. c) Ningún daño.
<b>II</b>	Apenas sentido	a) Sentido por pocas personas a bordo de pequeñas embarcaciones. No se observó en la costa. b) Ningún efecto. c) Ningún daño.
<b>III</b>	Débiles	a) Sentida por la mayoría de las personas a bordo de pequeñas embarcaciones. Observado por pocas personas en la costa. b) Ningún efecto. c) Ningún daño.
<b>IV</b>	Ampliamente observado	a) Sentido por todos a bordo de pequeñas embarcaciones y pocas personas a bordo en grandes buques. b) Observado por la mayoría de las personas en la costa. c) Ningún daño.
<b>V</b>	Fuertes	a) Sentida por todos a bordo de buques grandes y observada por todos en la costa. b) Trazas de capa de arena son abandonadas en terrenos de condiciones favorables. c) Límite de la inundación en tierras cultivadas. Límite de la inundación en instalaciones al aire libre (por ejemplo, jardines) y estructuras cercanas a la costa.
<b>VI</b>	Ligeramente perjudicial	a) Mucha gente se atemoriza y evacuan a tierras más altas. b) Daños e inundaciones en estructuras de madera. c) El efecto es soportado por la mayoría de los edificios de mampostería.

<b>VII</b>	Perjudicial	<p>a) La mayoría de la gente tiene miedo y tratan de correr hacia un terreno más altas, muchas pequeñas embarcaciones dañadas.</p> <p>b) Objetos de tamaño variable en el mar pierden estabilidad y van a la deriva. Capas de arena y acumulaciones de guijarros quedan rezagadas.</p> <p>c) Muchas estructuras de madera dañadas, demolidas o arrastrados. Daños de grado 1 e inundaciones en algunos edificios de mampostería.</p>
<b>VIII</b>	Muy perjudicial	<p>a) Todas las personas escapar a tierras más altas, algunos son arrastrados.</p> <p>b) Pocos grandes buques se mueven tierra o chocan entre sí. Objetos grandes se van a la deriva. Persiste la remoción de playas, ensuciándolas plenamente. Extensas inundaciones. Leves daños en el bosque de control de tsunami, detener derivas.</p> <p>c) Muchas balsas o botes son arrastrados y pocos parcialmente dañado. Las estructuras de madera se ven de lejos o demolidas. Daños de grado 2 en edificios de mampostería.</p>
<b>IX</b>	Destruutivo	<p>a) Muchas personas son arrastradas por salida del mar en tierra.</p> <p>b) Grandes buques se mueven violentamente hacia tierra. Remoción extensa de playas ensuciándolas. Hundimiento del terreno local. Destrucción parcial en bosques. La mayoría de embarcaciones artesanales son arrastrados y muchos parcialmente dañados.</p> <p>c) Daños de grado 3 en albañilería muchos edificios.</p>
<b>X</b>	Muy destructivo	<p>a) Pánico general. La mayoría de las personas son arrastradas por el mar. Los buques se mueven violentamente hacia tierra, muchos se destruyan y/o colisionan con casas y edificios.</p> <p>b) Arrastre de autos y derrame de combustibles, inicio de incendios. Hundimiento de la tierra.</p> <p>c) Daños de grado 4 en albañilería muchos edificios. Daños en diques artificiales.</p>
<b>XI</b>	Devastador	<p>a) Carreteras interrumpidas. Provocación de incendios. El agua arrastra y desplaza automóviles y otros objetos en el mar.</p> <p>c) Daños de grado 5 en muchos edificios de mampostería.</p>
<b>XII</b>	Completamente devastador	<p>a) Prácticamente todos los edificios de mampostería demolidos. La gran mayoría de edificios sufren daños de manera considerable.</p>

## 6.15. Características físicas de las ondas

Las características físicas de las ondas presentan atributos que determinan el tamaño, la forma y el aspecto general de una onda, como se describe a continuación:

- ↪ Cresta, es el punto más alto de la onda.
- ↪ Valle, es el punto más bajo de la onda.
- ↪ Amplitud de onda, es la distancia vertical entre la cresta y el valle.
- ↪ Período, Es el tiempo que demora la onda en ir desde una cresta hasta la siguiente, o sea, en repetirse.
- ↪ Frecuencia, Es el número de veces que la onda se repite en una unidad determinada de tiempo.

En la Figura 13, muestra físicamente como está constituida una onda.

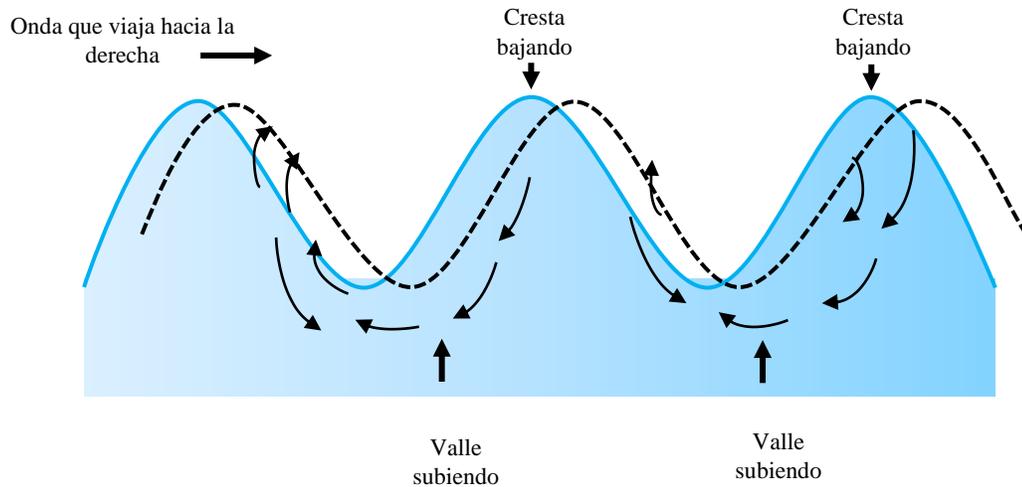


Figura 13. Características de una onda (Levin & Nosov, 2009).

### 6.15.1. Característica de las olas de un tsunami al llegar a la costa

La figura 14 se muestra el comportamiento y las características de las olas de un tsunami al llegar a la costa:

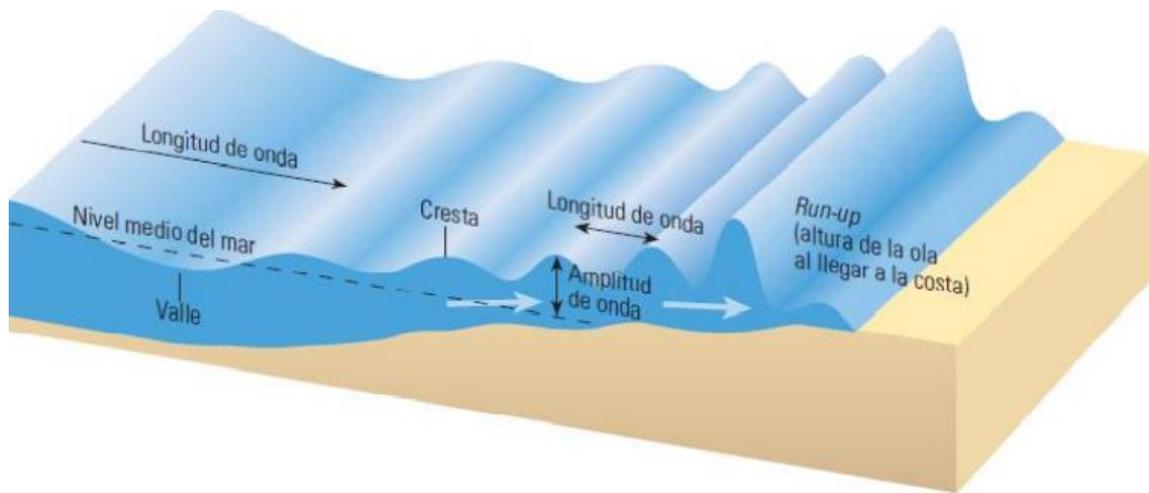


Figura 14 . Características físicas de un tsunami al llegar a la costa (*Levin & Nosov, 2009*).

**Run-up:** es la máxima altura del agua en la costa observada por arriba del nivel del mar, diferencia entre la elevación de penetración máxima de un tsunami, y el nivel de mar en el momento de ataque.

**Distribición del run-up:** conjunto de valores de run-up del tsunami medidos a lo largo de una costa.

**Altura del tsunami:** es la distancia vertical de la onda del tsunami antes de que incida en la costa.

**Inundación:** es la distancia horizontal de penetración del tsunami hacia tierra, medida desde la línea de la playa.

**Distancia de inundación:** distancia horizontal de la línea de inundación de un tsunami medida desde la línea de la playa.

**Área de inundación:** área inundada por el tsunami.

## 6.16. Modelado de tsunami

El modelo usado en este estudio fue TUNAMI-N2 Code, originalmente escrito por el profesor Fumihiko Imamura en el Centro de Investigación de Control de Desastres en la Universidad de Tohoku (Japón) a través del programa de intercambio de modelos de inundación de tsunamis (TIME) y modificado por Yanagisawa (2018).

Para el modelo de propagación del tsunami el código fuente del software está basado en la teoría de ondas de aguas someras, que integra verticalmente las ecuaciones de continuidad y de momentum lineal a lo largo de la columna de agua en el sistema ortogonal de coordenadas.

Las ecuaciones de conservación de masa y momento lineal son expresadas matemáticamente:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) = 0$$

$$g + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0 \quad \text{ec. 11}$$

Donde  $x$  e  $y$  son ejes horizontales,  $z$  el eje vertical,  $t$  tiempo,  $h$  la profundidad del agua en reposo,  $\eta$  el desplazamiento vertical de la superficie del agua por encima de la superficie del agua en reposo,  $u$ ,  $v$  y  $w$  son las velocidades de las partículas de agua en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ ,  $g$  la aceleración gravitacional y  $\tau_{ij}$  son las tensión de cizalla normal o tangencial en la dirección  $i$  en el plano normal  $j$ .

## Condición inicial en el cálculo computacional

El nivel inicial de agua es asumido constante durante el cálculo computacional. Por ende no se considera movimiento en el tiempo  $k-1$ . Esto significa que en el mar se tiene las siguientes consideraciones:

$$\eta_{i,j}^{n-1}, \quad M_{i+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}}, \quad N_{i+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} = 0 \quad \text{ec 12}$$

Donde  $n$  es nivel de agua inicial,  $M$  y  $N$  son los flujos de descarga en las direcciones  $x$  e  $y$ . Para la máxima altura de inundación vertical sobre tierra, el nivel de agua inicial  $\eta$  es igual a la altura de tierra  $h$ . Los subíndices  $i$  y  $j$  son las direcciones en el plano normal y el superíndice  $k$  es una variable temporal.

## Condición de Frontera

La ecuación del momento en la dirección  $z$  y las condiciones dinámicas en la superficie  $p = 0$  producida por la presión hidrostática.  $P = \rho g (\eta - z)$ .

Las condiciones dinámicas y cinéticas en la superficie y el fondo se dan de la siguiente manera:

$$p = 0 \qquad \qquad \qquad atz = \eta \qquad \text{ec.13}$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \qquad atz = \eta \qquad \text{ec. 14}$$

$$w = -u \frac{\partial h}{\partial x} - v \frac{\partial h}{\partial y} \qquad atz = -h \qquad \text{ec. 15}$$

### 6.16.1. Fricción inferior

Generalmente la fricción del fondo se expresa como el flujo uniforme, donde  $f$  es el coeficiente de fricción en la cual usa la Rugosidad de Manning. El coeficiente de fricción  $f$  y la rugosidad de Manning  $n$  están relacionados por:

$$n = \sqrt{\frac{fD^{\frac{1}{3}}}{2g}} \quad \text{ec. 16}$$

Lo que implica que  $f$  se vuelve bastante grande cuando la profundidad total  $D$  es pequeña ya que  $n$  permanece casi constante.

Por lo tanto, los términos de fricción del fondo se expresan de la siguiente manera:

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{fn^2}{D^{\frac{7}{3}}} M\sqrt{M^2 + N^2}$$
$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{fn^2}{D^{\frac{7}{3}}} N\sqrt{M^2 + N^2} \quad \text{Ec. 17}$$

Según Linsley, R & Franzini, B (1979) se asume un estado de superficie inferior  $n=0.025$  considerando canales naturales en buen estado.

### 6.16.2. Condición de estabilidad

El paso de tiempo computacional en el software de 0,25 s en orden de satisfacer la condición de estabilidad de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL). Por lo tanto la condición CFL debe cumplirse para la estabilidad del cálculo numérico:

$$CFL = c \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad \text{ec. 18}$$

Donde  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo en cada paso computacional,  $\Delta x$  es la resolución espacial de cada grilla,  $c = \sqrt{2gH_{max}}$  es la velocidad de propagación de la onda,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $H_{max}$  es la profundidad máxima de aguas tranquilas en una región de cálculo (Imamura & Yalciner, 2006).

### 6.17. Modelado de escenario de inundación

Para este modelo emplea la inundación pre-calculada utilizando el TUNAMI-N2 Code modificado por Yanagisawa, (2018). Resuelve ecuaciones no lineales en aguas poco profundas las cuales son discretizadas mediante el método de diferencias finitas centrales usando el algoritmo salto de rana escalonado (del inglés staggered leap frog), (fricción de fondo y convección) para áreas costeras (Koshimura, 2009).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{\frac{7}{3}}} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{\frac{7}{3}}} = 0 \quad \text{ec. 19}$$

### Diferencias finitas: Salto escalonado

El esquema del salto de rana, es el esquema de diferencia central con el error de truncamiento de segundo orden, establece las variables en un dominio espacial de grillas anidadas. Ver, Figura 15.

Las variables escalares como  $\eta$  o  $h$ , son definidas en el centro de celda computacional o grilla; las variables vectoriales, como  $M$  o  $N$ , están definidas a los lados.

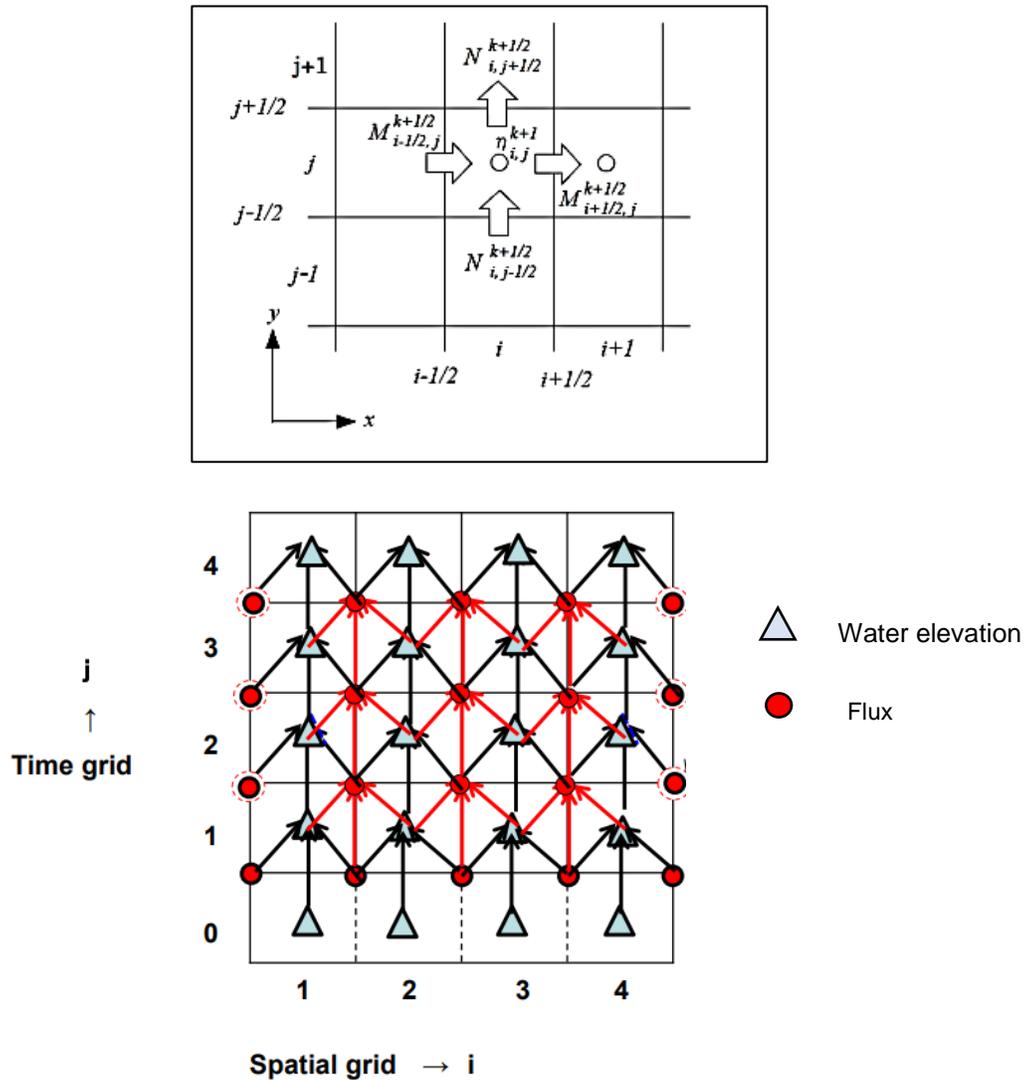


Figura 15. Representación del sistema escalonado salto de rana (Koshimura, 2009).

### 6.17.1. Ley de Green

Para conocer la amplitud máxima de la onda se aplica la ley de Green, que se refiere a la ley de conservación de la energía a lo largo de un oleaje, donde se demuestra que:

$$b_0 h_1^{1/2} a_0^2 = b_1 h_1^{1/2} a_1^2 \quad \text{ec. 20}$$

Donde **h** es la profundidad del agua, **b** la distancia entre los rayos, **a** es la amplitud del tsunami, y los subíndices **0** y **1** indican las diferentes localidades.

Si la amplitud del tsunami en la localidad 0 (en aguas profundas) es conocida, la amplitud del tsunami después de la propagación se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$h_1^2 = \left(\frac{b_0}{b_1}\right)^{1/2} \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^{1/2} h_0^2 \quad \text{ec. 21}$$

Para una onda plana el radio  $\frac{b_0}{b_1} = 1$  así que:  $h_1 = \sqrt[4]{\frac{d_0}{d_1}} h_0 \quad \text{ec. 22}$

### 6.17.2. Modelo de falla para la deformación del fondo oceánico

La condición inicial del modelo se obtiene de la teoría de deformación para un medio homogéneo y elástico (Okada, 1992). Se requiere los parámetros del mecanismo focal del sismo generador. La hipótesis es que la deformación del fondo marino (debido al sismo) se traslada (en forma casi instantánea) a la superficie del océano, lo que genera la propagación de las ondas del maremoto.

Se asume que el plano de falla es un rectángulo de dimensiones  $L$  (longitud) por  $W$  (ancho), ambas dimensiones con orden de magnitud de cientos de km, ver Figura 16.

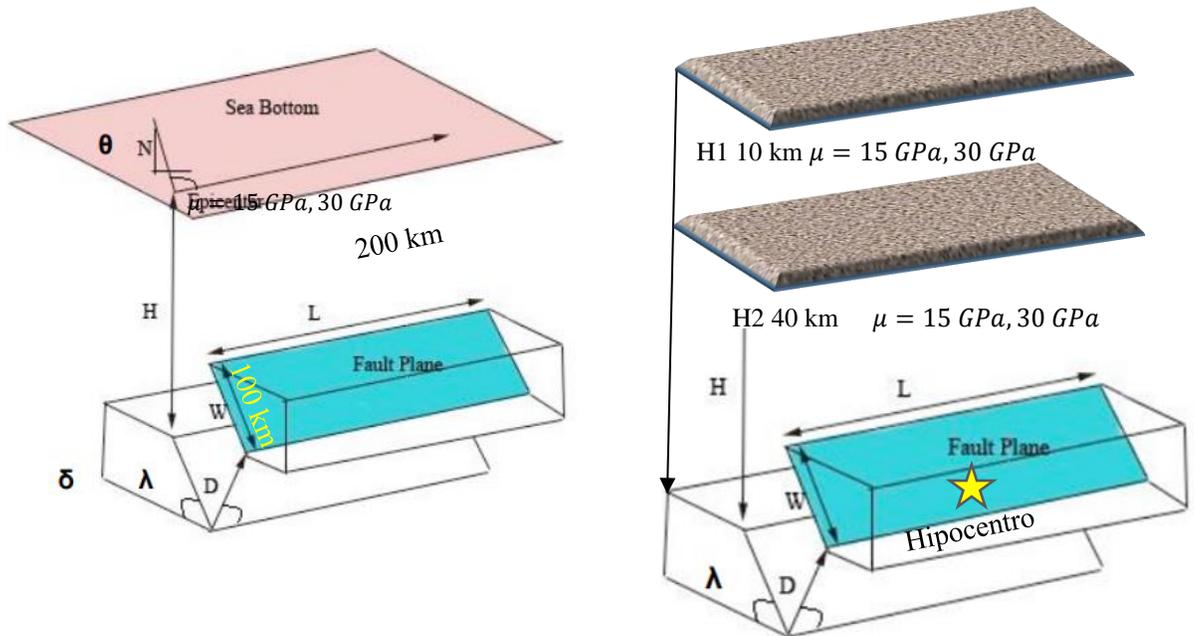


Figura 16. Parámetros de ruptura de fallas (Imamura & Yalciner, 2006).

El desplazamiento ( $u$ ) es iniciado en el foco del sismo o hipocentro; esta geometría y características de la fuente y el plano de falla en las que se consideran los ángulos (Strike, Rake y Dip), ver Figura 17.

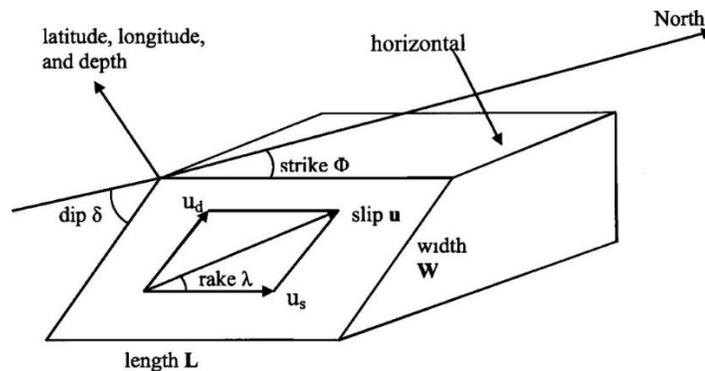


Figura 17. Parámetros del plano de falla. Se representa el bloque que subduce en una falla inversa (Sakate, 2014).

Para modelar la fuente sísmica, se necesitan conocer los siguientes parámetros:

El momento sísmico ( $M_0$ ): representa el producto del desplazamiento relativo de la fractura por su área y el coeficiente de rigidez del medio en que se ha producido, ec 8.

La magnitud de momento ( $M_w$ ): es una medida de la energía liberada por el sismo, está definido por ec. 9.

Se asume una falla rectangular con dimensiones L (longitud), W (ancho), u (punto de dislocación), a (área):

$$L = 10^{(-2.37+0.57)(M_w)} \text{ (Lengh)} \quad \text{ec. 23}$$

$$W = 10^{(-1.86+0.46)(M_w)} \text{ (Width)} \quad \text{ec. 24}$$

$$u = \frac{M_0}{(L*W*Rigidez)} \text{ (Slip)} \quad \text{ec. 25}$$

$$a = \sqrt{((L/2)^2 + (W/2)^2)} \text{ (Área de la parte deslizada)} \quad \text{ec. 26}$$

$$a = L.W \text{ (Área del bloque)} \quad \text{ec. 27}$$

La profundidad del hipocentro requiere los siguientes cálculos:

$$\text{Depth: } h - \left( \left( \frac{w}{2} \right) \cdot \text{seno} \left( \frac{dip}{180} \right) \right) \cdot 100 \quad \text{ec. 28}$$

$$\alpha = ATAN \left( \frac{W}{L} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad \text{ec. 29}$$

El cálculo de theta tiene las siguientes consideraciones:

$$\theta = \text{si strike} > 0 \text{ ó } \Rightarrow 90 \rightarrow 90 - \alpha - \text{strike}$$

$$\theta = \text{si strike} > 90 \text{ ó } \Rightarrow 180 \rightarrow 180 - \alpha - \text{strike}$$

$$\theta = \text{si } strike > 180 \text{ ó } \Rightarrow 270 \rightarrow 270 - \alpha - strike$$

$$\theta = \text{si } strike > 270 \text{ ó } \Rightarrow 360 \rightarrow 360 - \alpha - strike \quad \text{ec. 30}$$

La longitud de ruptura se define como la longitud del plano de falla en la dirección del rumbo.

Factor longitud y latitud:

$$long = a. \text{sen} \left( \frac{\theta. \pi}{180} \right) / 110$$

$$long = a. \text{cos} \left( \frac{\theta. \pi}{180} \right) / 110 \quad \text{ec. 31}$$

Punto de falla.

$$lon = \text{si } strike > 0 = 180 \rightarrow lon_{comp} - lon_{factor} \text{ , } lon_{comp} + lon_{factor}$$

$$lat = \text{si } strike > 90 = 270 \rightarrow lat_{comp} - lat_{factor} \text{ , } lat_{comp} + lat_{factor} \quad \text{ec. 32}$$

## 6.18. Factores del Riesgo

Los factores internos del riesgo se denominan factores de vulnerabilidad, mientras que los externos son llamados amenazas.

### 6.18.1. Definición de amenaza

**Peligro natural:** Una definición generalmente aceptada dice que los peligros naturales son "aquéllos elementos del medio ambiente físico, o del entorno físico, perjudiciales al hombre y causados por fuerzas ajenas a él" (Washington, 1993).

En otros países los documentos técnicos referidos al estudio de los fenómenos de origen natural utilizan el término amenaza, para referirse al peligro (Sanches, Puentes, & Morales, 2013).

Las amenazas naturales se pueden clasificar por origen en:

Geológicas: (terremotos, tsunamis, actividad volcánica).

Hidrometeorológicas: (inundaciones, tormentas tropicales, sequías) o biológicas (epidemias).

### 6.18.2. Caracterización de la exposición

La exposición se refiere a los elementos expuestos en el área de influencia de las posibles amenazas consideradas y estudiadas. En general son los componentes de infraestructura, la población y su contexto que pueden ser afectados por un evento determinado. Para realizar la caracterización de la exposición física es necesario identificar los diferentes componentes individuales incluyendo su ubicación geográfica, sus características geométricas, su vulnerabilidad ante el evento

peligroso, su valoración económica y el grado de ocupación que puede llegar a tener (Montas, Labour, & Adans, 2012).

El principal objetivo de una evaluación de amenazas (o de peligros) es predecir o pronosticar el comportamiento de los fenómenos naturales potencialmente dañinos en su defecto, tener una idea del comportamiento de dicho fenómenos para diferentes magnitudes. De este modo, se logra apreciar el riesgo que se correría en las zonas de influencia de las amenazas, si se utilizaría estas zonas para diferentes actividades humanas (en particular el uso habitacional).

## **6.19. Mitigación de desastres**

La predicción oportuna de un evento amenazante, puede salvar vidas humanas, aunque no atenúen en un cien por ciento las pérdidas económicas o la alteración social, el objeto fundamental de la mitigación de desastres es proteger la vida., eso sólo se puede lograr con medidas que deben ser tomadas con mucha antelación. Incluido en el concepto de mitigación de desastres, está el supuesto básico de que el impacto de un desastre puede ser evitado, o reducido, cuando su ocurrencia haya sido prevista durante la planificación para el desarrollo.

### **6.19.1. Evaluación de inundación por tsunami**

El tsunami tiene un alto poder destructivo debido a las siguientes razones principales:

- ↗ Pueden viajar miles de kilómetros con lo cual pueden afectar zonas costeras en toda una cuenca oceánica completa.

- ↗ La batimetría de la zona de aproximación a la costa, puede generar amplificaciones considerables que aumentan la altura y velocidad de aproximación de la ola.
- ↗ Las zonas costeras, son zona ampliamente pobladas especialmente aquellas en que los efectos del tsunami pueden ser más devastadores. (Montas, Labour, & Adans, 2012).

Los estimados de análisis de futuros tsunamis están basados principalmente en dos tipos de información:

- ↗ La historia pasada de los tsunamis.
- ↗ La predicción de terremotos tsunamigénicos.

Según (Fernandez, Molina, Havscov, & Atakan, 2000) del tsunami de 1992, se aprendieron dos lecciones:

- ↗ Un terremoto lento puede desencadenar un tsunami destructivo.
- ↗ La falta de grandes tsunamis históricos no significa necesariamente que no ocurrirán en el futuro.

Teniendo en cuenta lo último, es posible que pueda ocurrir un gran tsunami en otras áreas donde no se han registrado tsunamis anteriores. Esta posibilidad representa un peligro potencial, especialmente teniendo en cuenta la expansión del turismo a lo largo de las costas centroamericanas (Montas, Labour, & Adans, 2012). Si bien la premisa fundamental es que la ocurrencia histórica de un evento de cierta magnitud significa que un evento de magnitud similar ocurrirá en el futuro, en otras palabras, que el evento máximo registrado tenga una cierta magnitud, no significa que sea el evento máximo creíble (posible) en dicha región, esta información histórica es considerada como referencial.

## **CAPITULO VII**

### **Hipótesis**

El análisis de la amenaza de zonas expuestas, susceptibles a inundación por tsunami en la costa de Pochomil, puede ser evaluada a partir de la modelación de eventos sísmicos tsunamigénicos debido a variaciones de los parámetros geofísicos como, Magnitud ( $M_w$ ), rigidez (GPa) y profundidad (km).

## CAPITULO VIII

### Diseño metodológico

#### 8.1. Área de estudio

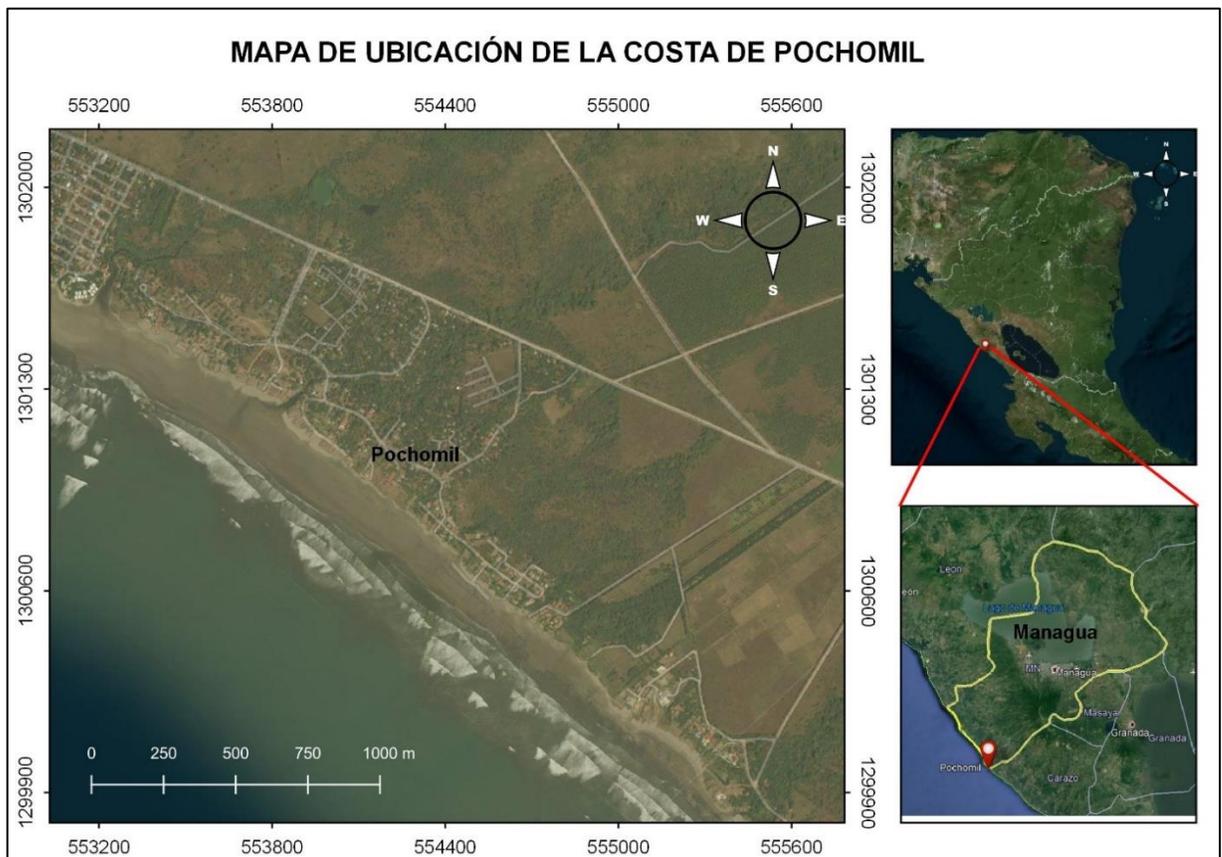
Pochomil se localiza a 65 km de la capital, pertenece al municipio de San Rafael del Sur departamento de Managua, sus límites geográficos son:

Norte: municipio de Managua y villa Carlos Fonseca.

Sur: municipio de Diriamba (dpto. Carazo) y el océano Pacífico,

Este: municipio de San Marcos Carazo.

Oeste: océano Pacífico.



Mapa 3: Mapa de localización del área de estudio.

## 8.2. Tipo de estudio

De acuerdo al método de investigación, por la clasificación de Hernández, Fernández y Baptista, (2014), el tipo de estudio es **correlacional**, y según el nivel inicial de profundidad del conocimiento es **descriptivo**., De acuerdo al tiempo de ocurrencia de los hechos, el estudio es **retrospectivo**, por el periodo de secuencia es **transversal** y según el análisis de alcance es **predictivo**, la escala de medición es de **intervalo**, y por su naturaleza y combinación del enfoque su variable es **mixta**.

## 8.3. Metodología

La metodología utilizada para el análisis de la amenaza por tsunamis, emplea procedimientos propuestos por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (Yamamoto & Aliaga, 2008) los cuales se describen a continuación.

### 8.3.1. Registro de datos históricos de tsunamis

La primera fuente de información en la región de interés son los registros históricos acerca de los parámetros del sismo de 1992 frente a las costas de Nicaragua encontrados en la base de datos de la plataforma Tensor del Momento Centroidal Global (catálogo CMT de Harvard) <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>

Así como los del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) <https://earthquake.usgs.gov/eventpage/usp0005ddn/executive>

También los registros en el catálogo de boletines de INETER y catálogo de IRIS.

### 8.3.2. Estudio de los factores socioeconómicos

Esta etapa lo constituye la caracterización de las estructuras expuestas, y de la población en general. Para este procedimiento se tomó como referencia una boleta de evaluación de estructuras dentro de zonas críticas de SINAPRED.

Se presenta la planilla (Figura 18) que se utilizó para caracterizar las edificaciones y datos generales de la población.

<b>BOLETA ESTRUCTURAL</b> <i>Utilizar esta boleta para evaluar estructuras dentro de zonas críticas</i>				
<b>I DATOS GENERALES</b>				
<b>Coordenadas</b>			<input type="text"/>	
<b>1.1 Fecha de la encuesta (d/m/a)</b>			_ / _ / _	
<b>II DATOS GENERALES DE LA ESTRUCTURA</b>				
<b>2.1 Cantidad de ocupantes:</b>			<input type="text"/>	
<b>Adultos.</b>	<b>Niños.</b>	<b>Jóvenes.</b>	<b>Ancianos.</b>	<b>Discapacitados</b>
<b>2.2 Año de construcción:</b>			<input type="text"/>	
<b>2.3 Uso de la edificación</b>			<input type="text"/>	
1. Vivienda Popular	6. Hospital	11. Industria/Fabrica/Bodega		
2. Vivienda Unifamiliar	7. Militar	12. Reunión		
3. Vivienda Multifamiliar	8. Oficina	13. Cultural		
4. Gubernamental	9. Iglesia	14. Deportivo Creativo		
5. Educativo	10. Comercio	15. Otros		
<b>2.5 Condición del Terreno</b>			<input type="text"/>	
1. Planicie: Pendiente entre 20° - 45°		Pendiente mayor a 45°		
2. Ladera: Mitad superior de la ladera		Mitad inferior de la ladera		
3. Base: Talud entre 20° - 45°		Talud mayor a 45°		
<b>III TIPO DE SISTEMA ESTRUCTURAL</b>				
<b>3.1 Concreto</b>	1. Marcos 2. Muros estructurales 3. Prefabricado		<input type="checkbox"/>	
<b>3.2 Mampostería</b>	1. Confinada 2. Reforzada 3. No reforzada		<input type="checkbox"/>	
<b>3.3 Prefabricados</b>	1. Si 2. No		<input type="checkbox"/>	
<b>3.4 Bambú</b>	1. Si 2. No		<input type="checkbox"/>	
<b>3.5 Construcción precaria</b>	1. Tierra 2. Madera 3. Zinc 4. Plástico 5. Otro		<input type="checkbox"/>	
<b>IV Nivel de estado de la estructura</b>	1. Bueno 2. Muy bueno		3. Frágil 4. Muy frágil	

Figura 18. Boleta estructural. Modificado de (SINAPRED, INETER, UNAN-Managua, & otros, 2017).

### 8.3.3. Diseño de un tsunami hipotético

A continuación se muestran los procedimientos a seguir para el diseño hipotético de un tsunami;

- a. *Adquisición de los datos.*
- b. *Modelación de tsunami.*
- c. *Mapa de amenaza de inundación.*

#### a. Adquisición de los datos

Se usaron datos topográficos y batimétricos que se encontraban disponible, no se tuvo acceso a batimetría y topografía de mejor resolución para el área de interés.

Se utilizó el conjunto de datos del cuadro de batimetría general de los océanos (GEBCO), [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/).

La Figura (19.a) muestra un ejemplo de GEBCO con un espacio de cuadrícula de 1 minutos de arco, la segunda (19.b) es el espaciado de cuadrícula de 30 segundos de arco, es un tamaño de cuadrícula más fino que el espaciado de un minuto de arco de GEBCO, ver Figura 19.

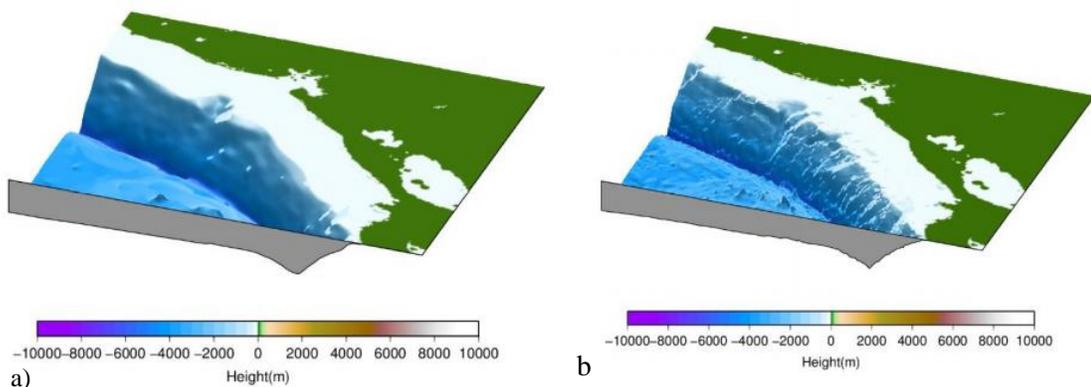


Figura 19. Datos de la cuadrícula de batimetría GEBCO para diferentes resoluciones. 19.a) muestra un espacio de rejilla de un minuto de arco. La figura 19.b) corresponde datos de batimetría para un espaciado de cuadrícula de 30 segundos de arco.

Para el cálculo computacional de la inundación por tsunami utilize topografía obtenida de la plataforma Earth data: <https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=srt>.

Los datos topográficos se tomaron de SRTM con resolución de tamaño de cuadrícula de 3 segundos de arco.

La figura 20 muestra un ejemplo de GEBCO 30 segundos de arco remuestreados a 2.222 segundos de arco en el área de Pochomil.

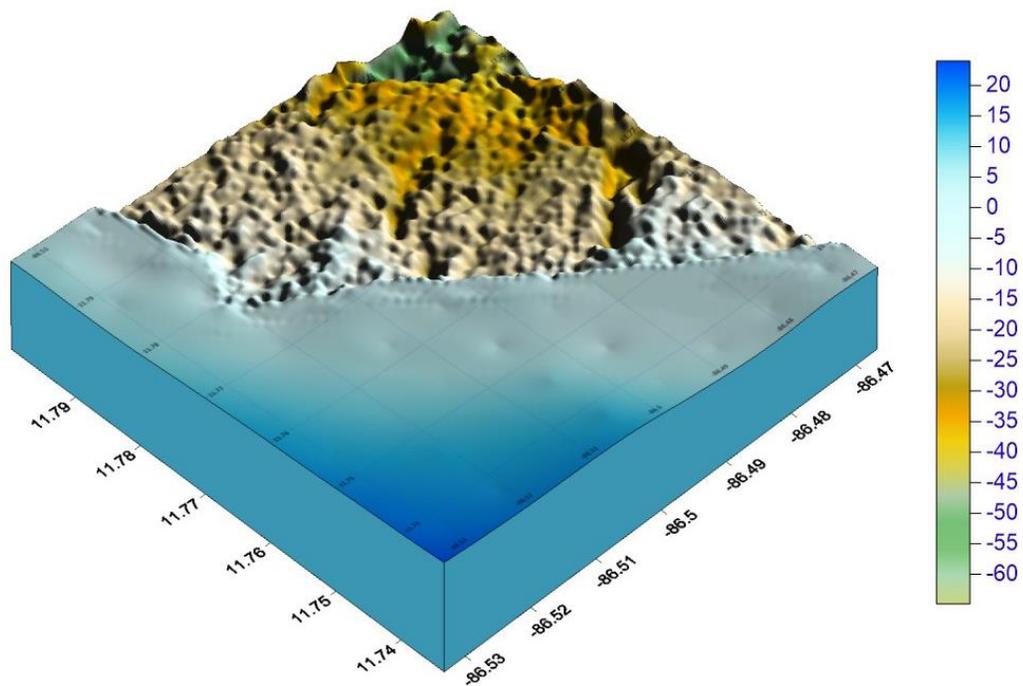


Figura 20. Modelo de Batimetría y Topografía combinado en la costa de Pochomil.

b. Modelación de tsunami

El modelado de tsunami, lo realice por métodos de simulación numérica en el software TUNAMI-N2 Code modificado por Yanagisawa, (2018) en sus tres fases: generación (modelo de fuente sísmica), propagación (simulación numérica mediante la teoría lineal) e inundación (simulación numérica mediante la teoría no-lineal).

Se usaron dos puntos de pronóstico computacional que corresponden al área donde se quiere determinar la altura de la ola. En este caso son frente a Pochomil con las siguientes coordenadas.

Lon 528766.76N      Lat 1297153.63W

Lon 531132.99N      Lat 1285775.58W

c. Mapa de amenaza de inundación

Como resultado final de los procesos anteriores realice el mapa de amenaza para la costa de Pochomil, mostrado en los resultados.

## CAPITULO IX

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se presenta los resultados obtenidos de la caracterización de las edificaciones de la costa de Pochomil, representados en el Gráfico 2. A continuación se describe las edificaciones de acuerdo al material de construcción. Estos datos fueron recolectados utilizando la planilla mostrada en la Figura 18.

#### Caracterización de las edificaciones.

De acuerdo al tipo de construcción de las viviendas se caracterizaron en los siguientes niveles: Buena, Muy buena, Frágil y Muy frágil. Representado en el Gráfico 2.

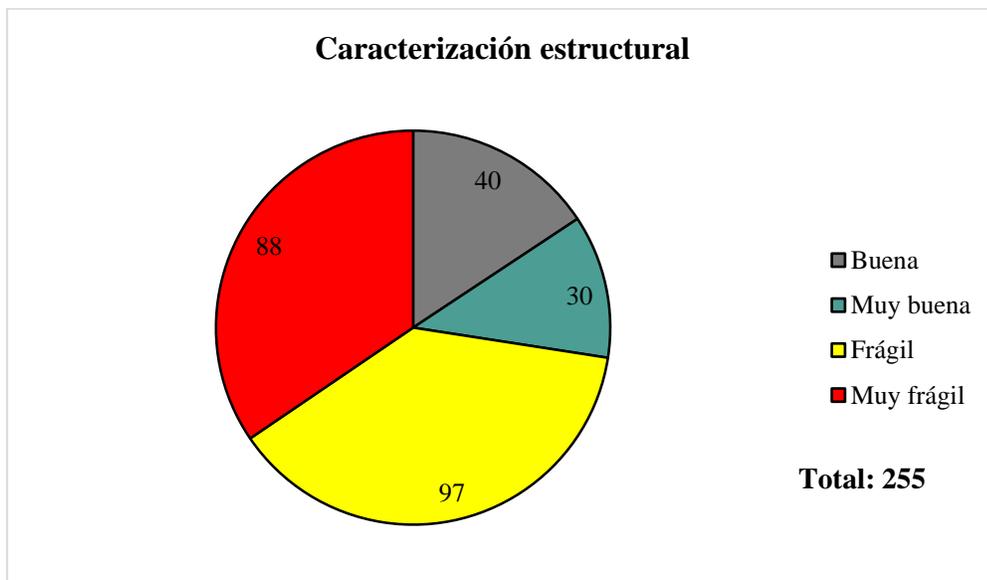


Gráfico 2. Gráfico tipo circular de la caracterización de edificaciones en la costa de Pochomil.

**Se explica los niveles estructurales para caracterizar las edificaciones** (Esta encuesta caracteriza cada edificación de manera general, con el propósito de conocer si las condiciones son favorables o perjudiciales en lo que respecta la orientación de la investigación).

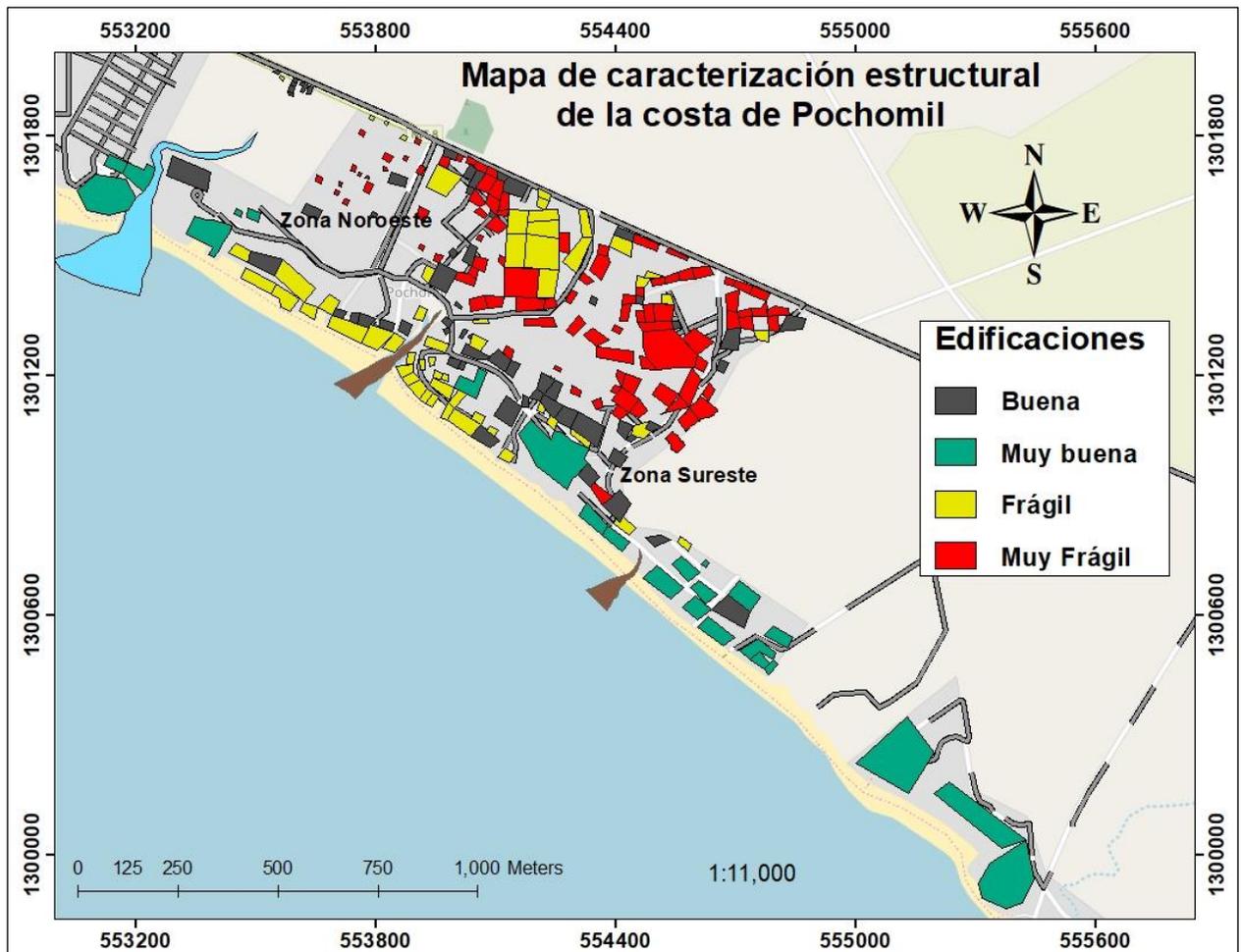
**Edificaciones Buenas** (color marrón): en esta clasificación se caracterizaron 40 viviendas construidas en los últimos 10 años, en su mayoría mampostería tradicional, están distribuidas en toda el área de estudio concentrándose en la zona Sureste.

**Edificaciones muy buenas** (color verde): Las 30 edificaciones que tiene todo un sistema de mampostería confinada, corresponden a 8 hoteles y 23 viviendas, 6 de las 23 viviendas son de renta, 1 de las casas de renta pertenece a la Foto 6.

**Edificaciones frágil** (color amarillo): Las viviendas que se consideran frágiles, corresponden a 97 en total, 65 viviendas han sido construidas en los últimos 5 años con materiales precarios, también están viviendas de mampostería tradicional que no son resistentes por el tiempo que llevan construidas, que han sido alrededor 10 años, distribuidas en toda el área de estudio, el resto corresponden a 32 bares y restaurantes que han sido construidos de madera frente a la costa., De los 32 restaurantes a lo largo de la costa 11 son de 2 pisos (en el periodo de adquisición de estos datos, estaban construyendo más restaurantes).

**Edificaciones muy frágiles** (color rojo): Las viviendas que están clasificadas en esta categoría están totalmente deterioradas, por el tiempo aproximadamente de 10 a 15 años, y material de construcción (zinc, madera y mampostería tradicional).

El presente Mapa 4, muestra la distribución de las edificaciones en la zona de interés, donde el color marrón representa las edificaciones en estado Buena, el color verde menta las edificaciones Muy buenas, el color amarillo las estructuras Frágiles, y el color rojo viviendas Muy frágiles. Este muestreo se realizó por cada vivienda sin embargo donde se ubicaron grupos de viviendas con las mismas características estructurales se representó por un solo polígono.



Mapa 4. Caracterización de las edificaciones de la costa de Pochomil de acuerdo al tipo de construcción.

En la Foto 2 se muestran un ejemplo de las características que presentan las viviendas para ser catalogadas como: Buena, Muy buena, Frágil, Muy frágil.

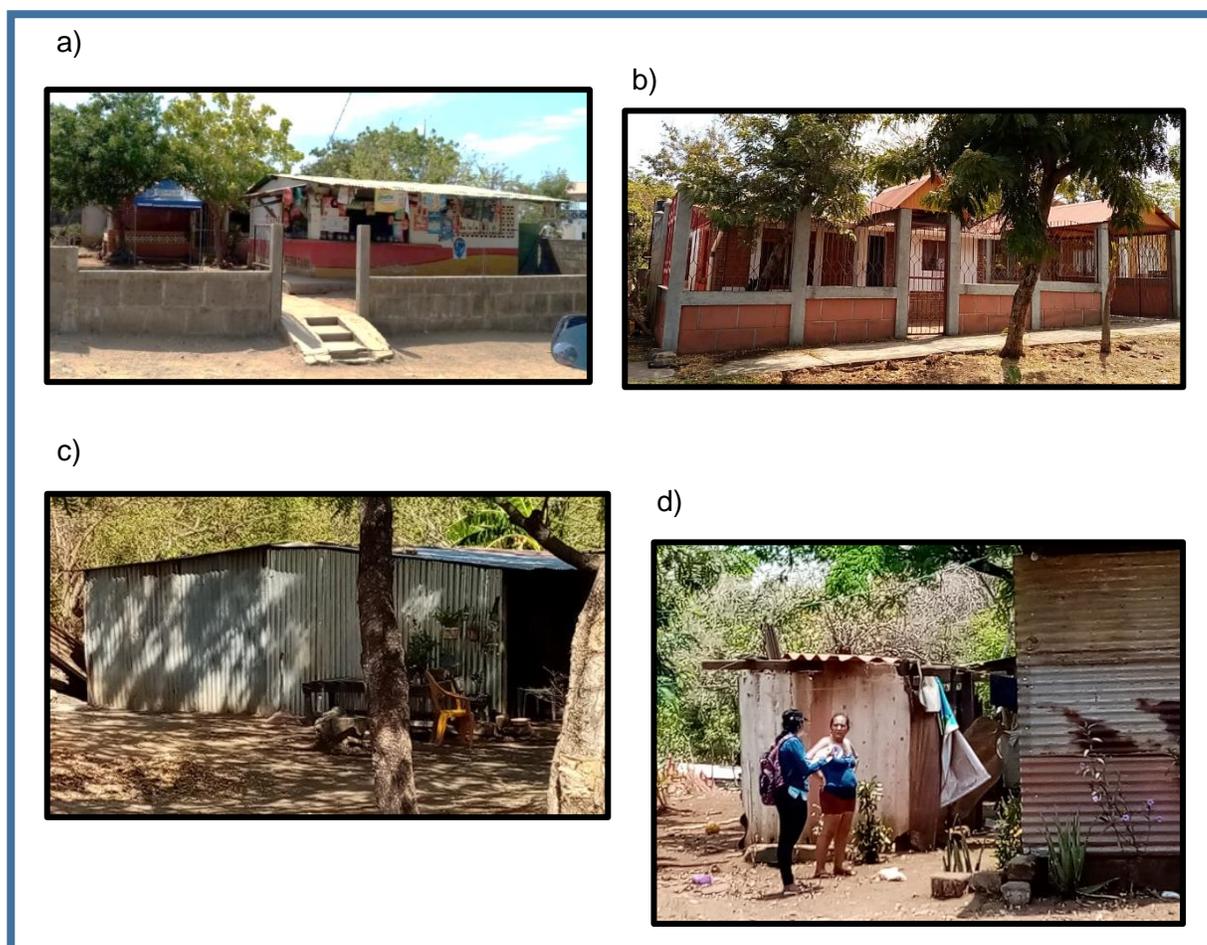


Foto 2. Caracterización de las edificaciones: a) Buena b) Muy buena c) Frágil d) Muy frágil.

## Caracterización general de la población de Pochomil

Se muestra los resultados de la encuesta realizada para conocer la densidad poblacional del área de estudio.

El área donde se asienta la población de Pochomil tiene una extensión territorial de 2 km<sup>2</sup>. La mayoría de los habitantes Pochomil (Gráfico 3) son adultos que se consideran entre los 30 y 50 años, los ancianos representan la minoría y con ello se suma personas con discapacidad. Sin embargo, los niños y jóvenes representan casi la mitad de la densidad población total. San Rafael del Sur representa uno de los municipios más pequeños del departamento de Managua, siendo Pochomil una costa que está en desarrollo socioeconómico.

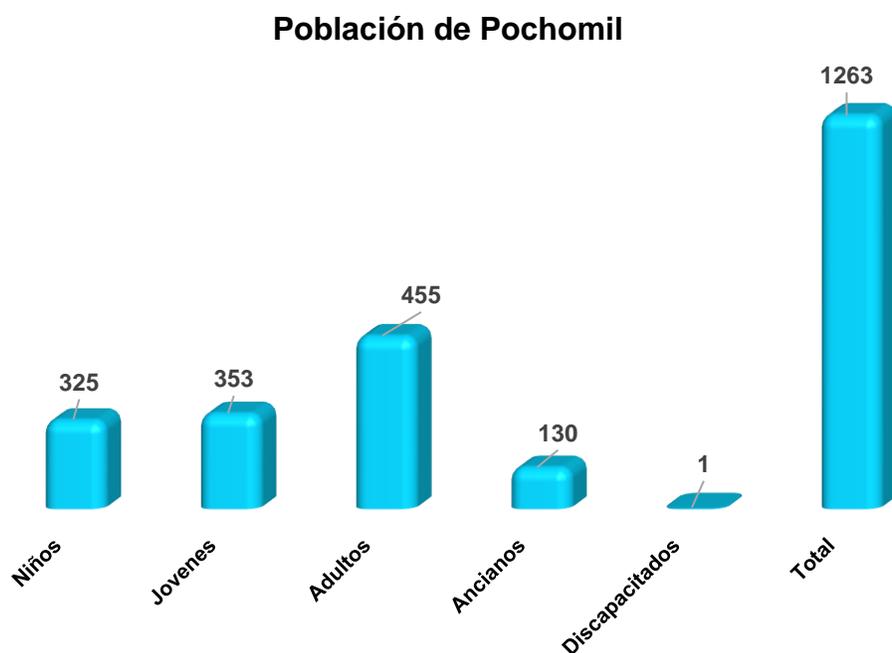


Gráfico 3. Gráfico de barra que representa la caracterización de la población de Pochomil.

## **Modelación de un tsunami hipotético.**

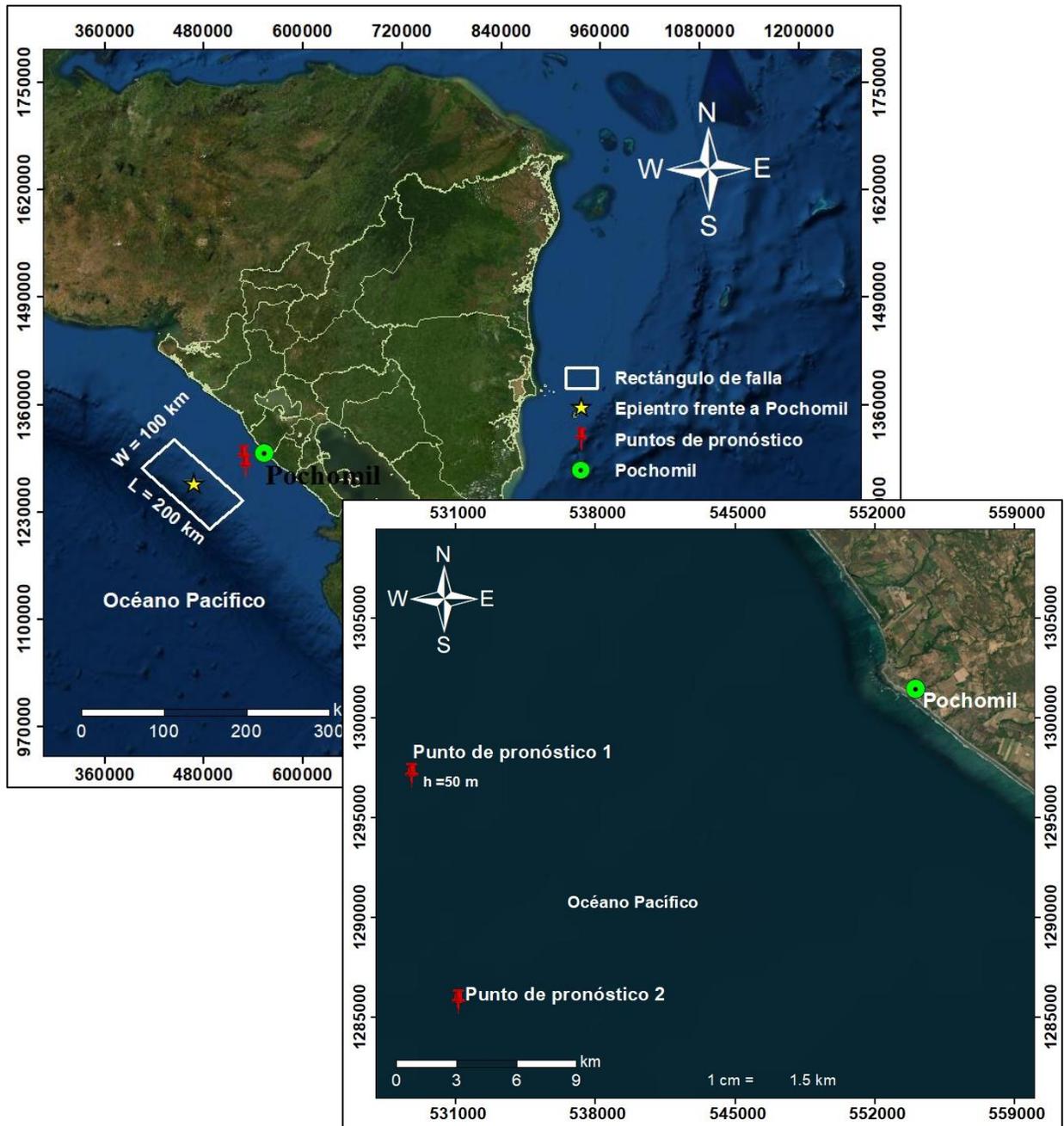
### **Modelación de escenarios de propagación.**

El tsunami de Nicaragua de 1992, permite emplear el modelo de plano de falla para aproximar los resultados de los escenarios a un evento real, con magnitud de 7.7  $M_w$ , ubicando el epicentro a 92 km de la línea costera, frente la zona a Pochomil en la Zona de Subducción del Pacífico.

*Tabla 4.* Se muestra las coordenadas computacionales, el epicentro para el modelaje de propagación de la ola frente la costa de Pochomil, y las coordenadas correspondiente a los puntos de control para conocer la altura de la ola en la zona de interés ubicado a 50 m de profundidad (H).

<b>Puntos</b>	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>
<b>Epicentro computacional</b>	469458.94N	126575.70W
<b>Puntos de pronóstico computacional 1</b>	528766.76N	1297153.63W
<b>Puntos de pronóstico computacional 2</b>	531132.99N	1285775.58W

El Mapa 5 muestra el epicentro computacional a una distancia de 92 km frente a Pochomil, y los puntos computacionales a 50 m de profundidad del mar, para pronóstico de la altura de la ola.



Mapa 5: Mapa de fuente sísmica. (Epicentro del sismo para la simulación de tsunami frente la costa de Pochomil).

Se realizaron cuatro modelos de propagación de la ola que se detallan a continuación:

- **Modelo de propagación 1.** Para este modelo se realiza con un Dip de 9.6 usando los siguientes parámetros mostrados en la Tabla 5, con coordenadas:

Long 469458.94N Lat 126575.70W

En la Tabla 5, se muestran los siguientes datos: columna 1 parámetros geofísicos, columna 2 datos de la falla inversa, columna 3 datos de la falla normal, columna 4 datos de la falla lateral con Rake de -179.

*Tabla 5.* Parámetros Geofísicos y planos de falla, inversa, normal y lateral con Dip = 9.6°.

<b><i>Parámetros</i></b>	<b>Inversa</b>	<b>Normal</b>	<b>Lateral</b>
Strike (°)	315	315	315
Dip (°)	9.6	9.6	9.6
Rake (°)	106.9	-106.9	-179
Magnitud $M_w$	7.7	7.7	7.7
Profundidad del hipocentro (km)	10	10	10
Rigidez (GPa)	15	15	15

Los parámetros de la Tabla 5 se usaron para los cálculos de entrada al software TUNAMI-N2 Code mostrados en la Tabla 6, estos fueron: dimensiones de la falla, coordenadas geográficas de la esquina de la falla, el deslizamiento del bloque, momento sísmico (columna 1). Además, en la columna 2 se muestra los datos calculados de la falla inversa, en la columna 3 los datos calculados de la falla normal y en la columna 4 los datos calculados de la falla lateral.

*Tabla 6.* Parámetros de entrada para el programa TUNAMI-N2 Code.

<b>parámetros</b>	<b>Inversa</b>	<b>Normal</b>	<b>Lateral</b>
Origen de la falla. Lon x	-87.62	-87.72	-87.94
Falla. Lat y	11.05	11.06	11.01
Profundidad (m)	8718.37	9005.14	9297.31
Slip (m)	5.93	6.43	6.53
Slip angle (°)	106.9	-106.9	-179
Longitud de la falla (m)	104472	124165	172981
Ancho de la falla (m)	48083	37325	26363
Área (m <sup>2</sup> )	5.0E+09	4.6E+09	4.6E+09
M <sub>0</sub> (N.m)	4.467E+20	4.468E+20	4.46E+20

El Gráfico 4 muestra el resultado de la modelación de propagación para una magnitud de 7.7  $M_w$  y altura de la ola, con los planos de falla inversa (línea roja), normal (línea azul) y lateral (línea negra); Dip= 9.6°.

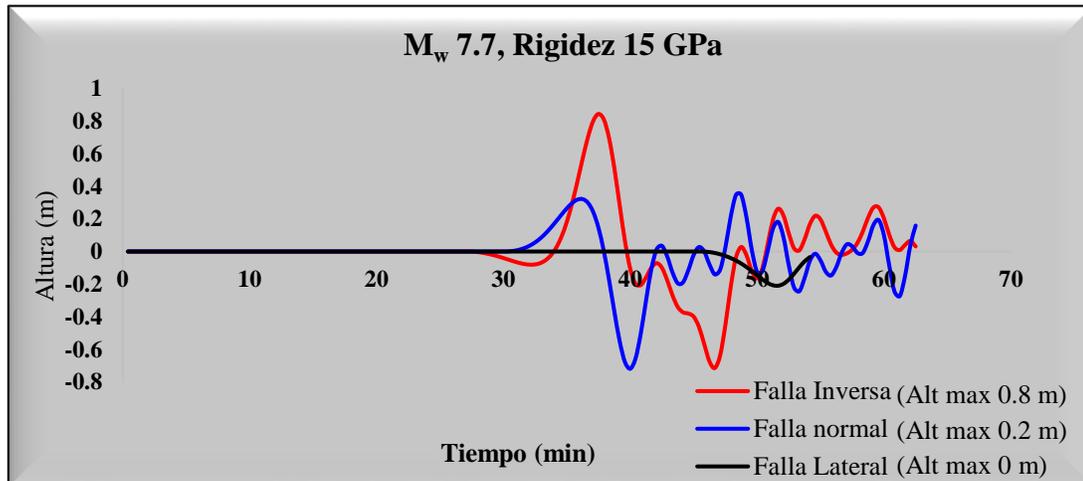


Gráfico 4. Propagación del tsunami con planos de falla, Inversa, normal y lateral. (Dip =9.6°).

A como se aprecia en el Gráfico 4, muestra el resultado de la propagación de la ola para un sismo de 7.7  $M_w$  a una profundidad de 10 km., el modelo de falla inversa produce una perturbación de 0.8 m generando un fuerte oleaje con un tiempo de arribo de la ola de 36.6 min. Mientras la falla normal no provoca suficiente perturbación, por lo cual la altura de la ola generada es 0.2 m en cuanto al tiempo de arribo es de 36.2 min. Para el caso del plano de falla lateral, no produce altura considerable de la ola. Los resultados muestran que un Dip de 9.6 ° no genera un desplazamiento vertical suficiente del fondo oceanico que desplace la columna de agua para generar un tsunami destructivo.

- **Modelo de propagación 2.** Para este modelo se usaron longitud de la falla, magnitud , rigidez, profundidad y Dip= 80.8°, con cordenadas:

Lon: 469458.94N Lat: 126575.70W

En la Tabla 7, se muestran los siguientes datos: columna 1 parámetros geofisicos, columna 2 datos de la falla inversa, columna 3 datos de la falla normal, columna 4 datos de la falla lateral pero Rake de -1°.

*Tabla 7* Parámetros Geofisicos y planos de falla, inversa, normal y lateral con Dip=80°.

<b>Parámetros</b>	<b>Inversa</b>	<b>Normal</b>	<b>Lateral</b>
Strike (°)	118	118	118
Dip (°)	80.8	80.8	80.8
Rake (°)	87.2	-87.2	-1
Magnitud $M_w$	7.7	7.7	7.7
Profundidad del hipocentro (km)	10	10	10
Rigidez (GPa)	15	15	15

Los parámetros de la Tabla 7 se usaron para los calculos de entrada al software TUNAMI-N2 Code mostrados en la Tabla 8, estos fueron: dimensiones de la falla, coordenadas geográficas de la esquina de la falla, el deslizamiento del bloque, momento sísmico (columna 1). Además, en la columna 2 se muestra los datos calculados de la falla inversa, en la columna 3 la falla normal y en la columna 4 la falla lateral.

Tabla 8. Parámetros de entrada para el programa TUNAMI-N2 Code.

<b>parámetros</b>	<b>Inversa</b>	<b>Normal</b>	<b>Lateral</b>
Origen de la falla. Lon x	-87.62	-87.72	-87.94
Falla. Lat y	11.05	11.06	11.01
M <sub>0</sub> (N.m)	4.4668E+20	4.468E+20	4.46E+20
Profundidad (m)	1000.00	18098.87	4279.63
Slip (m)	5.93	6.43	6.53
Slip angle (°)	87.2	87.2	-1
Longitud de la falla (m)	104472	124165	172981
Ancho de la falla (m)	48083	37325	26363
Área (m <sup>2</sup> )	5.0E+09	4.6E+09	4.6E+09

Con los cálculos anteriores se obtuvo la Gráfica 5, la cual muestra y compara el resultado de propagación de los 3 planos de falla, con Dip= 80.8°.

El Gráfico 5 muestra el resultado de la modelación de propagación y altura de la ola, debido a un terremoto generado por planos de falla inversa (línea roja), normal (línea azul) y lateral (línea negra); Dip= 80.8°.

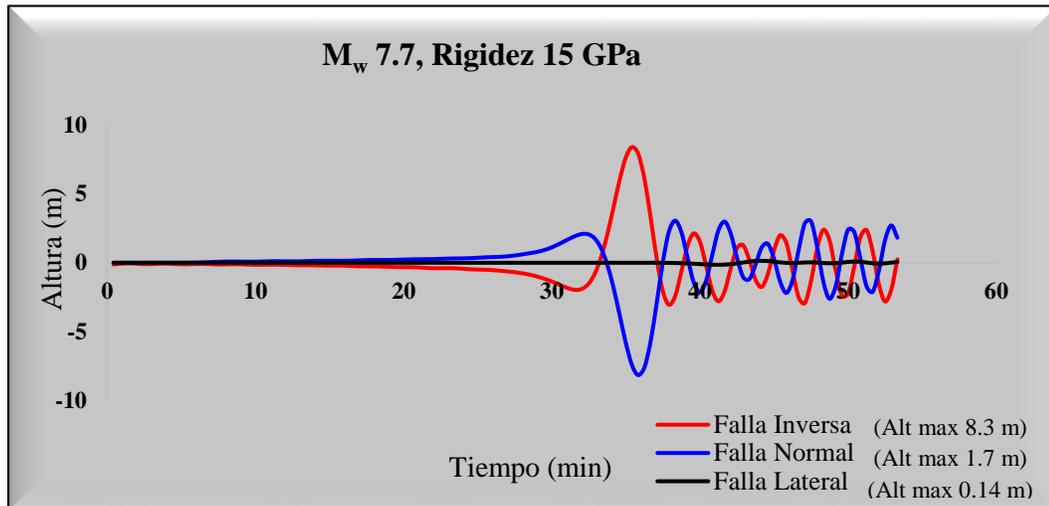


Gráfico 5. Propagación del tsunami con plano de falla Inversa, Lateral, Normal (Dip=80.8 °).

En el Gráfico 5, se aprecia la predicción de un tsunami generado por un sismo de 7.7 M<sub>w</sub> con ángulo Dip de 80.8 °. La falla inversa produce una perturbación vertical suficiente por lo cual la altura de la ola generada es 8.3 m y con un tiempo de arribo de la ola de 35.8 min. Mientras, que el tsunami ocasionado por la falla normal produce apenas una ola de 1.7 m y con un tiempo de arribo de la ola de 32.9 min. Es evidente que la ola generada por la falla lateral al no generar ningún movimiento vertical de la columna de agua alcanza apenas 0.14 m, por lo que se esperaría una perturbación comparable a un fuerte oleaje.

De acuerdo a los resultados anteriores, el plano de falla que generó mayor amplitud de la ola, fue el de falla inversa. Por consiguiente, se realizó un escenario de propagación frente a las costas de Pochomil, con los planos de falla inversa calculados por las siguientes fuentes: USGS, GCTM y Tanioka, para el sismo ocurrido en 1992 frente a León.

- **Modelo de propagación 3.** Para este modelo se usó Magnitud 7.7  $M_w$ , rigidez (15 GPa), profundidad (10 km) constantes para los 3 planos de falla., las coordenadas del sismo hipotético son las siguientes:  
Long 469458.94N Lat 126575.70W.

En la Tabla 9, se muestran los planos de falla calculados por: USGS, GCTM y Tanioka (2017) para el sismo de 1992 frente a León.

*Tabla 9.* Parámetros Geofísicos y plano de falla inversa.

<b>Fuente</b>	<b>Strik (°)</b>	<b>Dip (°)</b>	<b>Rake (°)</b>
USGS	130	79	93
GCTM	122	78	90
Tanioka	118	80.8	87.2

Los parámetros de la Tabla 9 se usaron para los cálculos de entrada al software TUNAMI-N2 Code mostrados en la Tabla 10, estos fueron: coordenadas geográficas de la esquina de la falla, dimensiones de la falla, el deslizamiento del bloque, momento sísmico (columna 1). Además, en la columna 2 se muestra los datos de entrada para el modelo de falla de USGS, la columna 3 para los GCTM y en la columna 4 los de Tanioka y con epicentro frente a Pochomil.

Tabla 10. Parámetros Geofísicos de las fuentes: USGS, GCTM, Tanioka.

<b>Parámetros</b>	<b>USGS</b>	<b>GCTM</b>	<b>Tanioka</b>
Origen de la falla. Lon x	-87.62	-87.62	-87.62
Falla. Lat y	11.05	11.05	11.05
$M_0$ (N·m)	4.4668E+20	4.4668E+20	4.4668E+20
Profundidad (m)	1000.00	1000.00	1000.00
Slip (m)	5.93	5.93	5.93
Slip angle (°)	79	78	80.8
Longitud de la falla (m)	104472	104472	104472
Ancho de la falla (m)	48083	48083	48083
Área (m <sup>2</sup> )	5.0E+09	5.0E+09	5.0E+09

Con los parámetros de la Tabla 10 se realizó la gráfica 6, la cual muestra la propagación de la ola y el tiempo de arribo para las tres fuentes sísmicas calculadas para el sismo 1992, ubicando el epicentro frente a Pochomil.

El Gráfico 6, muestra la propagación de la ola., la línea color negro representa el resultado del modelo de falla de USGS con 8.0 m la amplitud de la ola, la línea color rojo representa el resultado de la fuente de GCMT con una amplitud de la ola de 8.2 m, y la línea color azul representa la propagación de la fuente de Tanioka con una amplitud de la ola de 8.4 m.

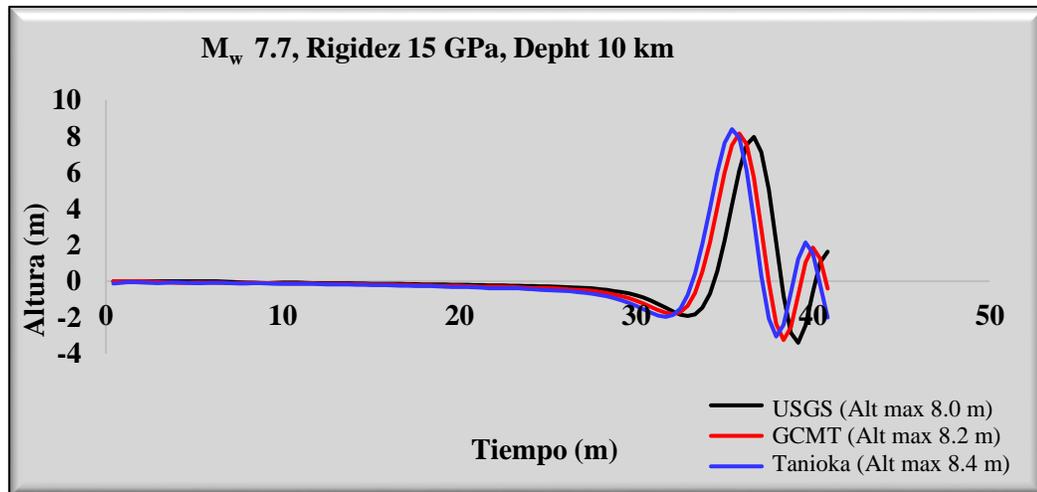


Gráfico 6. Comparación de la propagación de tsunami de las fuentes: USGS, GCTM, Tanioka. ( $M_w$  7.7, Depth 10 km).

El tiempo de arribo fue entre 35.8 y 36.2 minutos, los modelos concuerdan con las predicciones de la altura de la ola para el sismo de 1992, que se observó entre 3 - 7 m, y en algunos puntos de la costa la amplitud de la ola fue de 8 m, 9 m y 10 m, como Marcella y Transito (Sakate et al; 1993), se debe tomar en cuenta que esta vez el sismo se supone frente a Pochomil por lo que es concordante la estimación de la altura del tsunami para esta zona.

De acuerdo a los escenarios anteriores los parámetros de plano de falla inversa (calculados para el sismo de 1992) que generaron mayor amplitud de la ola en los escenarios de propagación, fue el Modelo de Tanioka, (Strike: 118°, Dip: 80.8°, Rake: 87.2°). Se uso los datos de Tanioka para modelar escenarios de propagación, con el cual se establecen los escenarios de inundación para la costa de Pochomil.

La magnitud, 7.7  $M_w$  como referencia al evento ocurrido del sismo de 1992 y 8.0  $M_w$  como un escenario máximo creíble (Tabla 11, columna 1). Además, por cada magnitud se usó dos profundidades de origen del sismo (columna 2) y dos rigidez por cada profundidad (columna 3).

*Tabla 11.* Parámetros para escenarios de propagación del tsunami. Por cada magnitud se varía la profundidad y la rigidez.

Magnitud $M_w$	Profundidad (km)	Rigidez (GPa)
<b>7.7</b>	10	15
		30
	40	15
		30
<b>8.0</b>	10	15
		30
	40	15
		30

- **Modelo de propagación 4.** Las condiciones de la Tabla 8 se usaron para calcular los parámetros de entrada con magnitud de 7.7  $M_w$ , variaciones de la profundidad y rigidez mostrados en la Tabla 12 para generar los nuevos escenarios de propagación.

Tabla 12. Parámetros de entrada al software TUNAMI-N2 Code para un sismo de 7.7  $M_w$  para profundidades de 10 km y 40 km, con rigidez de 15 GPa y 30 GPa.

<i>Parámetros</i>	<b>7.7 <math>M_w</math>, Depth 10 km</b>		<b>7.7 <math>M_w</math>, Depth 40 km</b>	
	<b>15 GPa</b>	<b>30 GPa</b>	<b>15 GPa</b>	<b>30 GPa</b>
Fault origin (lon or x-grid)	-87.62	-87.62	-87.62	-87.62
Fault (lat or y-grid)	11.05	11.05	11.05	11.05
Depth (m)	1000.00	1000.00	29566.63	29566.63
Slip (m)	5.93	2.96	5.93	2.96
Slip angle (°)	87.20	87.20	87.20	87.20
Fault length (m)	104472	104472	104472	104472
Fault Width (m)	48083	48083	48083	48083
Cal área (m <sup>2</sup> )	5.0E+09	5.0E+09	5.0E+09	5.0E+09
$M_o$	4.47E+20	4.47E+27	4.47E+20	4.47E+20

El Gráfico 7 se muestra el resultado de la propagación de la ola y el tiempo de arribo, generado por un sismo de magnitud 7.7  $M_w$ , a una profundidad de 10 km. La curva azul muestra la propagación de la ola, para una rigidez de 15 GPa, generando una altura máxima de 8.4 m, y un tiempo de arribo de 35.8 min. La curva roja muestra una altura de 4.1 m, para una rigidez de 30 GPa y, el tiempo de llegada de la ola es de 35.8 min.

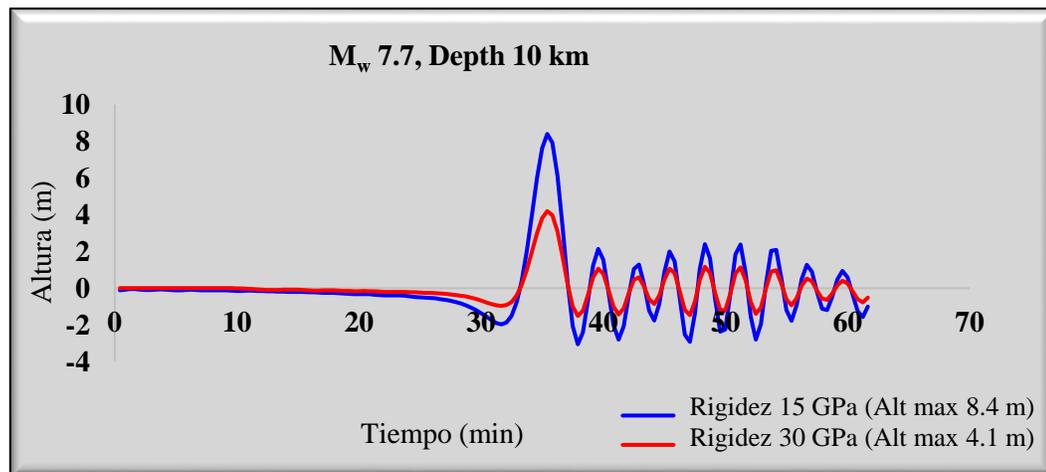
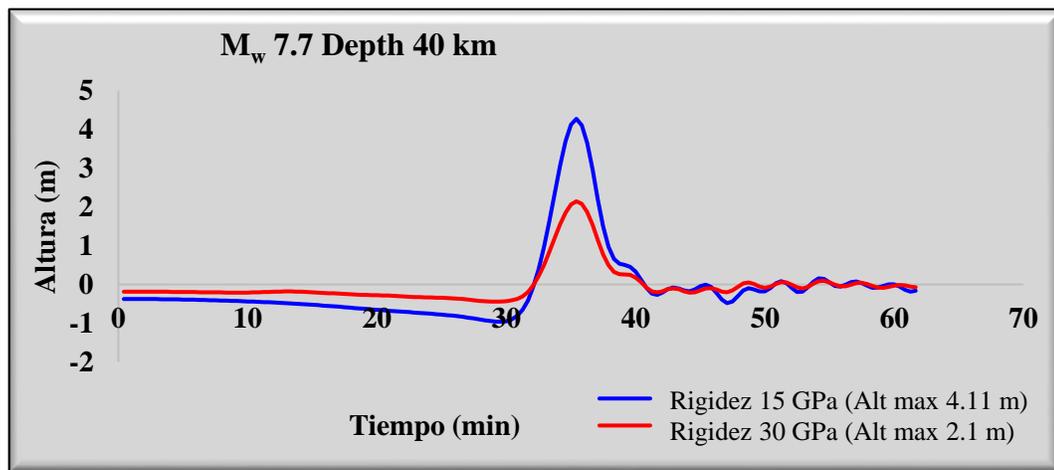


Gráfico 7. Propagación de la ola con 7.7  $M_w$ , Depth 10 km (15 GPa y 30 GPa).

El presente Gráfico 8 muestra la propagación de la ola y el tiempo de arribo, generado por un sismo de magnitud 7.7  $M_w$ , a una profundidad de 40 km. La curva azul muestra la propagación de la ola, para una rigidez de 15 GPa, con una altura máxima de 4.11 m, y un tiempo de arribo de 35.4 min. La curva roja muestra la propagación de la ola, para una rigidez de 30 GPa, donde el resultado la altura de la ola es de 2.1 m, y, el tiempo de llegada de la ola es de 35.4 min.



Con las condiciones de la Tabla 8 se calcularon los parámetros de entrada con magnitud de 8.0  $M_w$ , con variaciones de la profundidad y rigidez mostrados en la Tabla 13, para generar los nuevos escenarios de propagación.

*Tabla 13.* Parámetros de entrada al software para un sismo de 8.0  $M_w$  para profundidades de 10 km y 40 km, con rigidez de 15 GPa y 30 GPa.

Parámetros	8.0 $M_w$ , Depth 10 km		8.0 $M_w$ , Depth 40 km	
	15 GPa	30 GPa	15 GPa	30 GPa
Fault origin (lon or x-grid)	-87.79	-87.79	-87.79	-87.79
Fault (lat or y-grid)	10.88	10.88	10.88	10.88
Depth (m)	10000.00	10000.00	25664.12	25664.12
Slip (m)	8.20	4.10	8.20	4.10
Slip angle (°)	87.2	87.2	87.2	87.2
Fault length (m)	154881	154881	154881	154881
Fault Width (m)	66069	66069	66069	66069
Cal área (m <sup>2</sup> )	1.02E+10	1.02E+10	1.02E+10	1.02E+10
M0	1.26E+21	1.26E+21	1.26E+21	1.26E+21

El presente Gráfico 9, muestra la propagación de la ola y el tiempo de arribo, generado por un sismo de magnitud 8.0 Mw, a una profundidad de 10 km. La curva azul muestra la propagación de la ola, para una rigidez de 15 GPa, resultando una altura máxima de 14.09 m, y un tiempo de arribo de 36.66 min. La curva roja muestra la propagación de la ola, para una rigidez de 30 GPa, en la que se obtuvo una altura máxima de 6.9 m, y el tiempo de llegada de la ola es de 38.0 min.

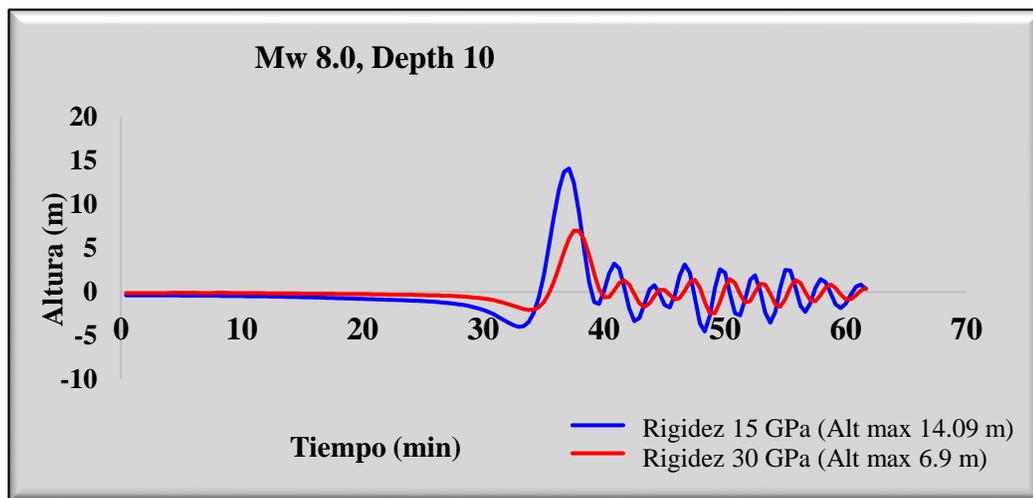


Gráfico 9. Propagación de la ola con 8.0 Mw, Depth 10 km (15Gpa y 30 GPa).

El presente Gráfico 10 muestra la propagación de la ola y el tiempo de arribo, generado por un sismo de magnitud 8.0  $M_w$ , a una profundidad de 40 km. Donde la curva azul muestra la propagación de la ola, para una rigidez de 15 GPa, dando como resultado una altura máxima de 8.4 m, y un tiempo de arribo de 37.9 min. La curva roja muestra la propagación de la ola, para una rigidez de 30 GPa, en la que se obtuvo una altura máxima de 5.6 m, y el tiempo de llegada es de 38.3 min.

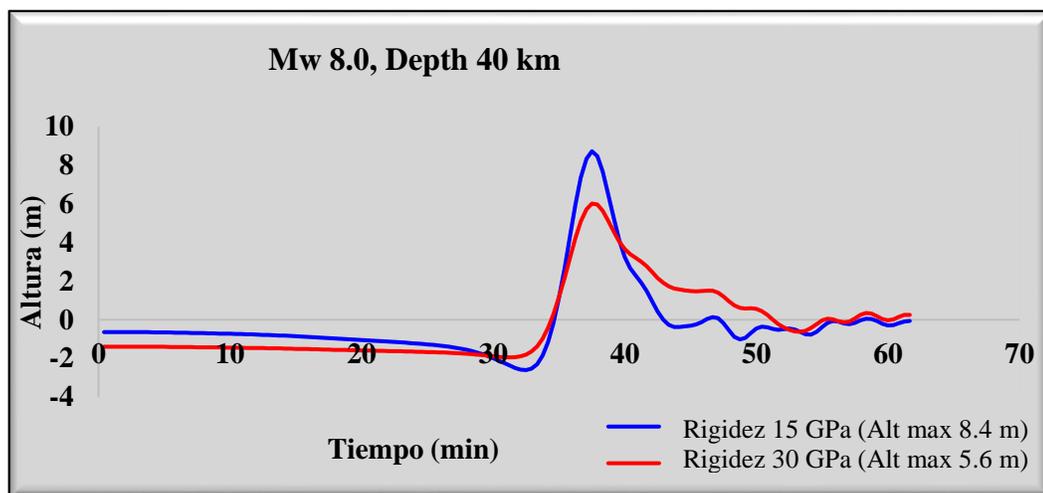


Gráfico 10. Propagación de la ola con 8.0  $M_w$ , Depth 40 km (15 GPa y 30 GPa).

## Escenarios de inundación

De acuerdo con los escenarios de propagación se realizaron dos modelos de inundación de magnitud 7.7  $M_w$  y 8  $M_w$  con los parámetros que genero mayor amplitud de la ola, para ambas magnitudes se suponen los siguientes datos:

- **Hipocentro a 10 km de profundidad.**
- **Rigidez de 15 GPa.**
- **Distancia de la costa 92 km.**

Y los parámetros de falla corresponde a los calculados por Tanioka, (2016)

**Dip: 80.8° Strike: 118° Rake: 87.2°**

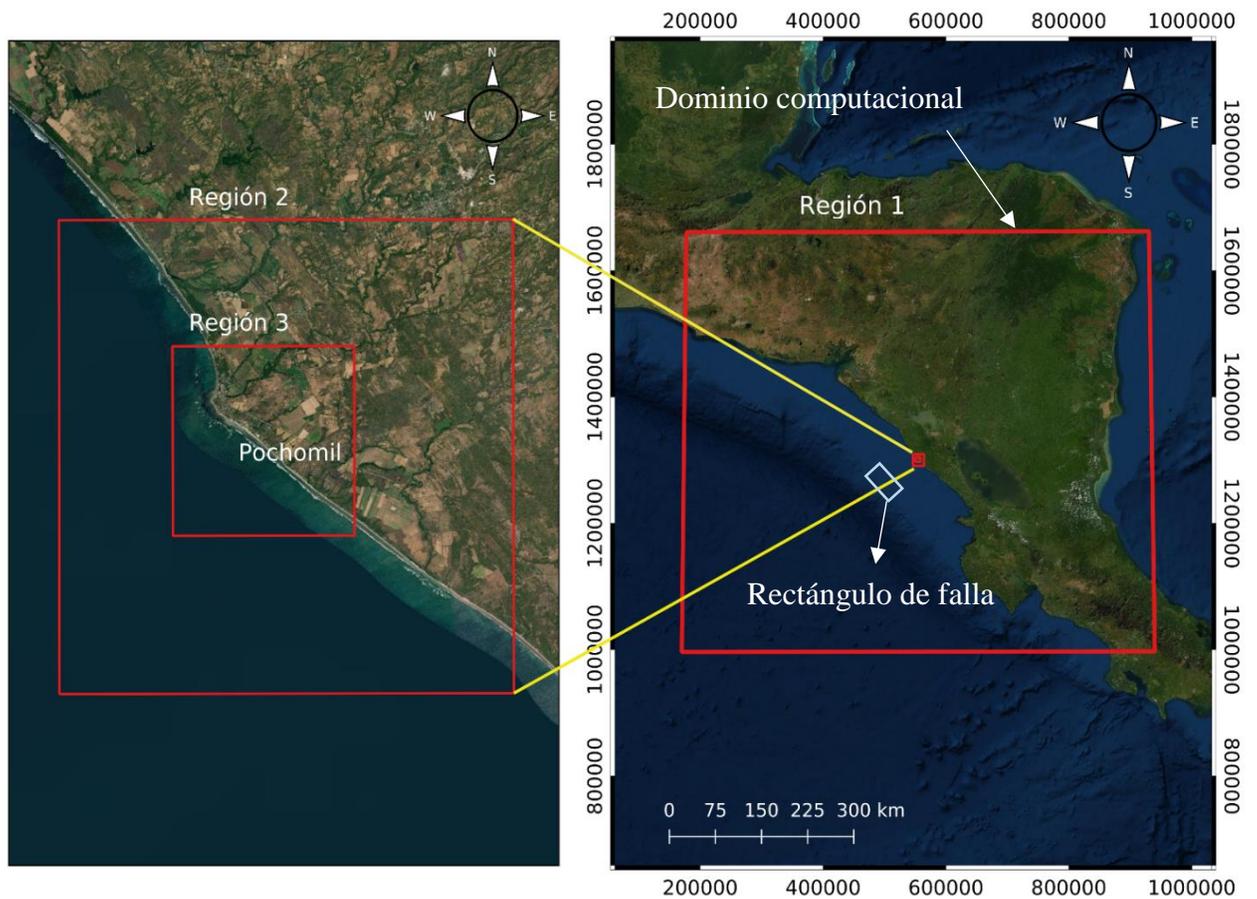
Las simulaciones de inundación se realiza, con TUNAMI-N2 Code calculado por Yanagisawa,( 2018), el cual uso grillas anidadas y el ultimo dominio o región de batimetría combinado con la topografía del área de interés.

Se realizó 3 recortes de batimetría R1, R2, R3 con las siguientes coordenadas, ver Tabla 14.

Tabla 14. Coordenadas computacionales de las regiones R1, R2, R3.

	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>
<b>Región 1</b>	177363.03N	1660533.37W
	284968.19N	169317.10E
	280150.92N	995432.95E
	170100.33N	996184.58W
<b>Región 2</b>	219429.85N	1310662.43W
	564448.62N	13019436.01W
	564487.41N	1291005.51W
	546321.57N	1290972.89W
<b>Región 3</b>	550840.60N	13014495.47W
	558106.75N	1304508.44W
	558117.72N	1297133.23W
	550855.87N	1297120.34W

El Mapa 6 muestra los dominios computacional hasta llegar a una región local de Pochomil (R3) la cual fue combinada con la topografía del área de interés.

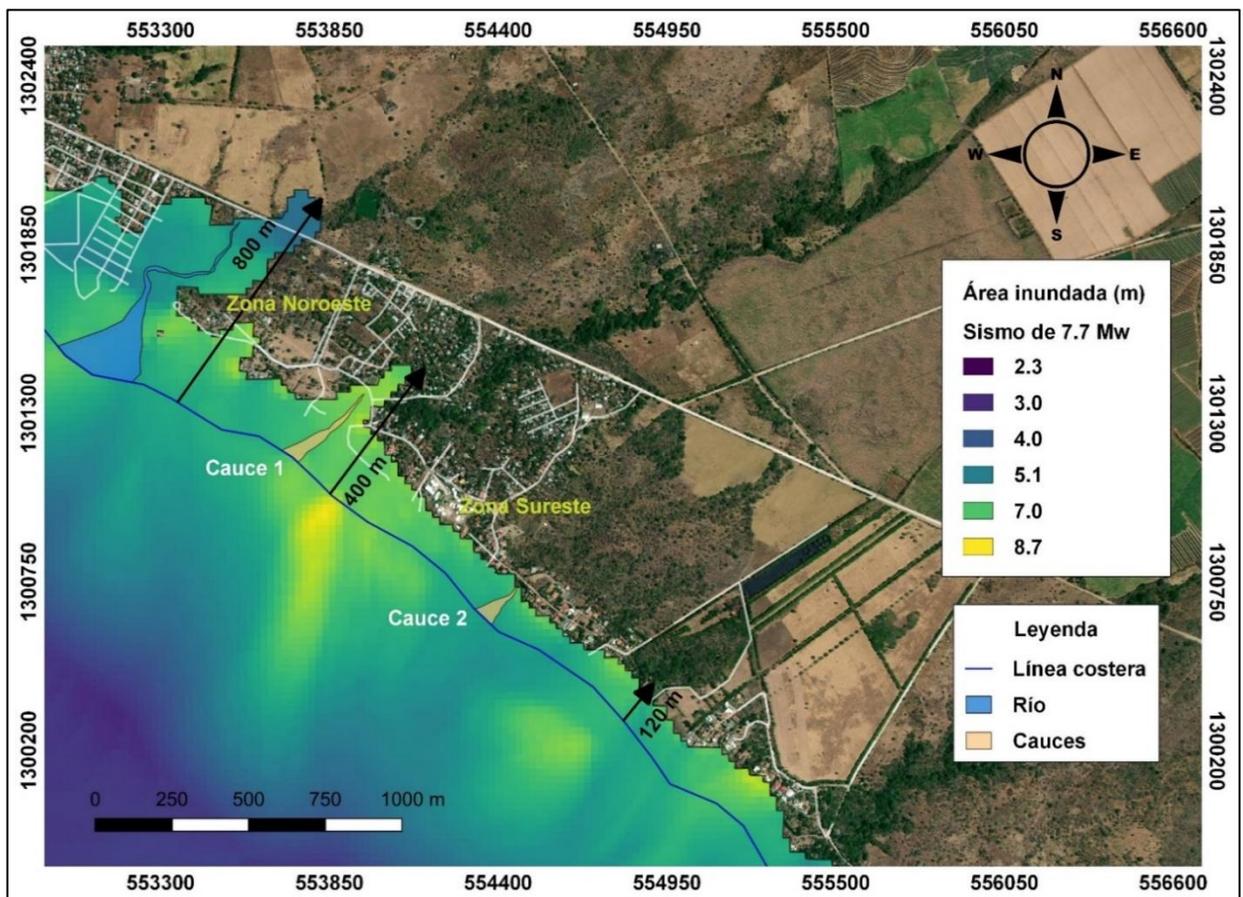


Mapa 6. Regiones de batimetría que muestra los dominios computacionales hasta llegar a R3 que esta combinado con la topografía del área de estudio.

## Simulación de inundación.

A continuación se presenta el resultado del modelo de inundación que se realizó en base al escenario de propagación del Gráfico 7, en cual se usó TUNAMI-N2 Code modificado por Yanagisawa, (2018) donde convina el dominio R3 con la topografía de la costa, con un sismo de magnitud 7.7  $M_w$ , y rigidez de 15 GPa, a una profundidad de 10 km, usando los parámetros de falla del sismo de 1992 calculados por Tanioka.

El Mapa 7 muestra el área inundada en la costa de Pochomil para un sismo de magnitud 7.7  $M_w$ , a una profundidad de 10 km el color amarillo pronostica la máxima altura esperada con 8.7 m de inundación, la cual va a depender de la pendiente del relieve en que se encuentren las edificaciones.



Mapa 7. Mapa de Pochomil y el área inundada para un sismo de magnitud 7.7  $M_w$ .

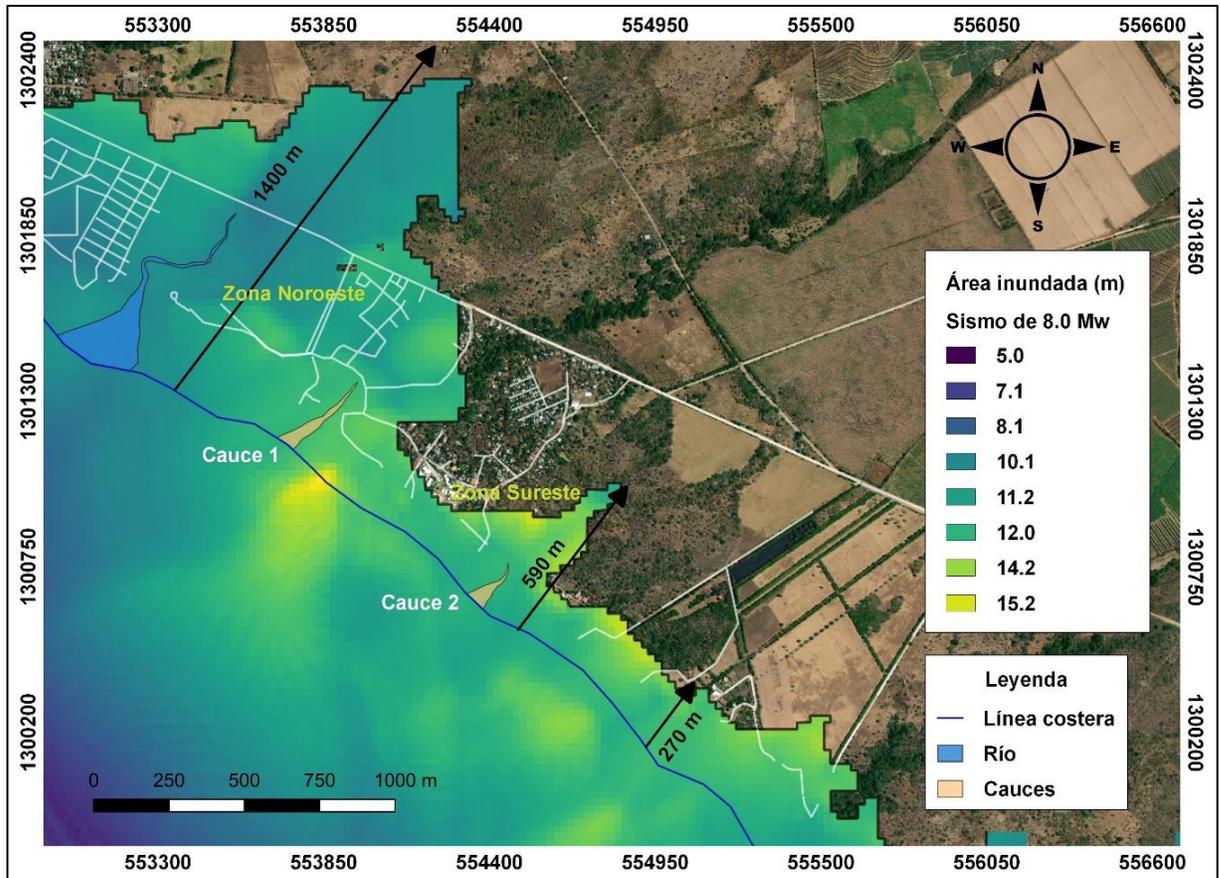
Por efectos de análisis la costa de interés se ha dividido en dos áreas, zonas Noroeste y Sureste.

Para el Mapa 7 la mayor área de inundación fue la zona Noroeste de la costa de Pochomil, donde run-up fue de 8.7 msnm, debido a la poca resistencia y baja elevación de 1 msnm alcanzo una extensión territorial de 800 m en la dirección del canal fluvial representado por el río Pochomil, con inundaciones de 8 m en la desembocadura del rio. Mientras tanto, el margen Noroeste del río presenta elevación promedio entre 3 y 8 msnm, siendo esta zona menos inundada,

La zona parte Sureste de Pochomil, presenta mayor elevación entre 11 a 25 msnm, el agua se introduce a través del cauce 1 alcanzado una extensión de 400 m. Sin embargo esta zona es menos afectada por las inundaciones abarcando 120 m desde la línea costera tierra adentro.

## Simulación de inundación.

El Mapa 8 muestra el modelo de inundación en la costa de Pochomil para un sismo de magnitud 8  $M_w$  a una profundidad de 10 km, en base al Gráfico 9 con rigidez de 15 GPa. El color amarillo muestra la máxima altura de la ola con 15.2 m (max) y 5.0 m (min) representada por el color morado.



Igualmente para su análisis la costa se ha dividido en dos áreas, zona Noroeste y Sureste. La mayor área de inundación fue la zona Noroeste de la costa de Pochomil, donde run-up fue de 15.2 m, alcanzando una extensión territorial de 1400 m en la dirección del río Pochomil, con inundaciones entre 7 m y 13 m para esta zona.

La zona Sureste de Pochomil tiene mayor elevación, los cauces 1 y 2 facilitan el acceso del tsunami abarcando una extensión territorial de 590 m desde la línea costera inundando aproximadamente entre 5 y 9 m de altura.

La zona Sureste tiene elevaciones de 10 hasta 25 msnm, para este hipotético caso donde los resultados estiman la altura de la ola de 15.2 m los taludes en esta área aumentan la resistencia al paso del tsunami. Por consiguiente la extensión territorial que abarcaría es de 270 msnm.

## **Cuantificación de la amenaza de las edificaciones en la costa de Pochomil.**

De acuerdo al Mapa 7 que muestra el área inundada debido a un sismo de magnitud 7.7  $M_w$ , genero un run up de 8.4 m. Por efectos de interpretación el arribo de la ola se analiza en dos fases.

La primera fase corresponde a las estructuras en la orilla de la costa conformadas por: (1) bares y restaurantes clasificados en la categoría Frágil, y (2) hoteles y viviendas clasificadas como Muy buena, son las primeras edificaciones impactadas por el tsunami., consecuente a esto, las edificaciones frágiles son las que presentaran mayor afectación debido al material de construcción. La segunda fase, corresponde edificaciones ubicadas tierra adentro conformadas por estructuras buenas, para esta zona el tsunami afecta la parada de buses.

De acuerdo al Mapa 9 se muestra el área inundada debido a un sismo de magnitud 8.0  $M_w$ , generando un run up de 15 m. Para interpretar el arribo de la ola se analiza en dos fases.

La primera fase, siempre afectara las estructuras en la orilla de la costa, causando mayor daño a las edificaciones frágiles, mientras las Muy buenas resistirán este impacto. La segunda fase, inunda toda la zona Noroeste que abarca: (1) la parada de buses, (2) edificaciones Frágiles, que están en este sector siendo las más dañadas, (3) las estructuras Buenas, que se inundaran pero resistirán el impacto, (4) las estructuras Muy frágiles corresponden a la minoría de este tipo de vivienda, serían destruidas totalmente, y (5) las carretera principal seria inundada y obstruida.

La parte Sureste es el área donde se ubican edificaciones de todo tipo como, iglesia, escuelas y la mayor parte de las viviendas Muy frágiles se concentran en esta zona, acorde a esto no se ven afectada por inundaciones para ninguno de los tsunamis generados con magnitudes de 7.7  $M_w$  y 8.0  $M_w$ .

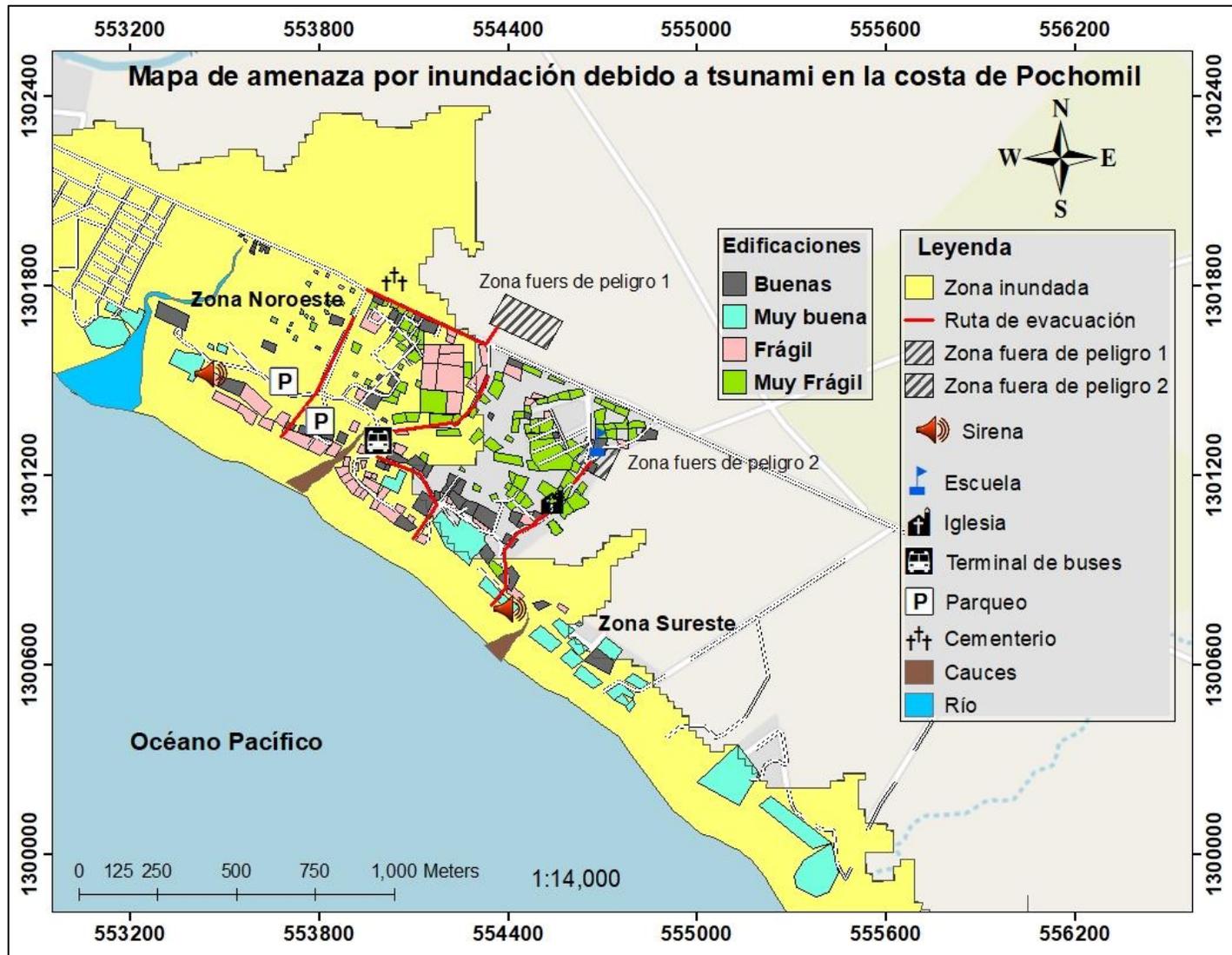
## **Mapa de amenaza**

Considerando las normas establecidas por orientación de (SINAPRED & INETER, 2019) el Mapa 9 se destacan: área inundada, las rutas de evacuación, zona fuera de peligro, las sirenas, iglesia, escuela, y parada de buses. El área inundada se representa a través del color amarillo, debido a que las instituciones internacionales determinaron que el color amarillo permite que una persona daltónica pueda reconocerlo.

Según el área inundada, la zona fuera de peligro para la zona Noroeste corresponde el área fuera de peligro 1, para la zona Suroeste el área fuera de peligro y zona de evacuación es la escuela El Madroñal, donde hay una elevación de 25 msnm, esta este sitio se podría usar como albergue.

Las ubicaciones de cada icono en el Mapa se determinaron desde el lugar a través de GPS.

Las rutas de evacuación corresponden a las vías seguras que poseen menos obstáculos.

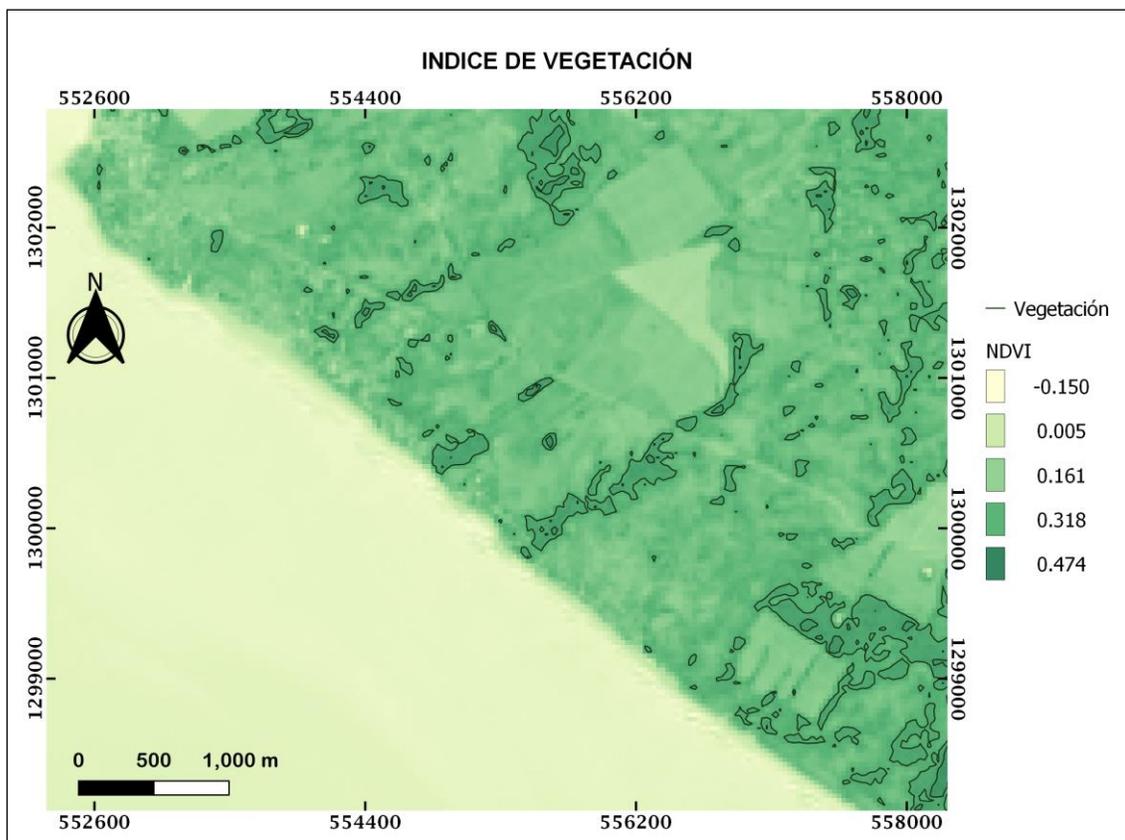


Mapa 9. Mapa de amenaza por inundación debido a tsunami en la costa de Pochomil

## Uso y cobertura de suelo

En el Mapa 10 se muestra el índice de vegetación de la zona de interés.

La vegetación cumple un efecto de estabilización por el refuerzo del suelo (la acción de las raíces), ayuda a detener residuos arrastrados por el agua, reducen la altura y energía de las olas del tsunami y la profundidad de la inundación, por último, contienen los vientos con arena, sin embargo para el caso de Pochomil tiene una vegetación de arbustos tropicales, la urbanización de esta costa poco a poco está disminuyendo la vegetación, considerándose un factor que vuelve la zona de estudio susceptible.



Mapa 10. Índice de Vegetación para la zona costera de Pochomil.

Los índices de vegetación, presenta valores menores de cero para cuerpos de agua (color amarillo), los valores para 0.005 (color verde tierno) representa poca vegetación, mientras el máximo 0.474 (color verde) se caracterizan por áreas de mayor vegetación.

## **Medidas de mitigación por inundación debido a tsunami en la costa de Pochomil.**

A continuación se presentan las siguientes medidas de mitigación para reducir los daños que podría provocar este tipo de evento:

1. Actualizar el mapa de amenaza para costa de Pochomil.
2. Actualizar el sistema de alerta temprana de Tsunami.
3. Ubicar letreros adecuadamente visuales que ilustren las rutas de evacuación a la zona fuera de peligro.
4. Sensibilizar el colectivo de lugares recreativos para que participen de los simulacros de respuesta en caso de tsunami.
5. Brindar información a la población de Pochomil acerca de la amenaza a la que están expuesta.
6. Es conveniente para las estructuras Muy frágiles y Frágiles ubicadas en la zona Noroeste reconstruirlas totalmente de concreto. En el caso de tener los recursos reubicarlas.
7. Las estructuras Buenas y Muy buenas ubicadas en las zonas altas pueden ser usadas momentáneamente para albergar personas que no han evacuado o que son visitantes, para ello debe haber una planificación de parte de los residentes y las autoridades locales.
8. Con respecto al parqueo 1 que también es terminal de buses, en caso de tsunami no se puede usar ningún tipo de vehículo para evacuar, debido a que la salida de este es estrecho. Además, cuando se use el parqueo 2 (disponible en ciertos periodos del año) no se puede usar los vehículos para evacuar por las mismas condiciones.
9. Las personas que se encuentren en la parte Noroeste deberán usar calle principal a Pochomil para evacuar a la zona 1 fuera de peligro. Las personas que se encuentren en la parte Suroeste deberán usar las rutas de evacuación dirigidos a la zona 2 fuera de peligro.

10. Evitar el despale, para reducir la velocidad de flujo de un tsunami, ya que crea un bloque contra los escombros flotantes y ayuda a disminuir los daños a las viviendas que se encuentran tierra adentro.
11. Restablecimiento y reconstrucción de carreteras locales para funcionamiento como rutas de escape directo a las zonas de evacuación.

## CAPITULO X

### Conclusiones

1. De los resultados de modelación, el evento que genera una ola de mayor amplitud fue ocasionada, por los siguientes parámetros geofísicos: plano de falla inversa, magnitud 8.0  $M_w$ , rigidez 15 GPa, profundidad 10 km, Dip, 80.8, Rake 87.2, y slip 118. El modelo propagación de la ola generó una altura de 14.2 m y tiempo de arribo de 36.6 minutos.
2. Acorde al mapa de inundación del tsunami se obtuvo que la propagación fue de 1400 m desde la línea costera a tierra firme, esto se debe a las siguientes condiciones: 1) la presencia de canales fluviales, el Río Pochomil en el extremo Noreste y dos cauces, que atraviesan perpendicular a la costa de Pochomil 2) el tipo de vegetación, y baja elevación del relieve.
3. De acuerdo al mapa de inundación, el área mayor afectada es la zona Noroeste. Esta zona se caracteriza por presentar una topografía inferior a los 10 m y donde se encuentran algunas viviendas Muy Frágiles, pero la mayoría corresponden a edificaciones Frágiles en el borde costero. La zona Sureste presenta una topografía con elevación superior a los 15 m, donde se ubican estructuras Buenas, Muy buenas, Frágiles y la mayor cantidad de viviendas muy frágiles, siendo estas menos afectadas por las inundaciones.
4. El estudio de tsunami para la costa de Pochomil ha mostrado la eficacia de la implementación de modelos sísmicos para aproximarse al comportamiento que puede presentar un tsunami.
5. Para los planificadores de Mitigación ante estos desastre, es de interés conocer la densidad poblacional, debido a que provee información básica que indica la

cantidad de personas que podrían ser afectadas, y las que necesitarían ser evacuadas de forma inmediata ante cualquier alerta de tsunami.

6. La amenaza por inundación debido a tsunami para la población de Pochomil puede ser mitigado en gran medida con la educación e implementación de las actividades de respuesta sobre qué hacer en caso de presentarse un evento.

## **CAPITULO XI**

### **Recomendaciones.**

Las recomendaciones propuestas a continuación se realizan sobre la base en lo que respecta el foco de la investigación.

Se recomienda en caso que esté disponible una nueva versión del software TUNAMI-N2 Code y batimetría con mejor resolución, realizar modelos de amenaza de tsunamis, para mostrar con más detalle el posible comportamiento de las inundaciones en las comunidades costeras expuestas a este tipo de amenaza.

Se recomienda actualización y disponibilidad de datos batimétricos y topográficos para las costas de Nicaragua, con el fin de brindar herramientas para los diversos estudios de base científica, o proyectos académicos.

## CAPITULO XII

### Referencias

- Aki, K., & Richards, P. (1980). QUANTITATIVE SEISMOLOGY. SECOND EDITION. Lee A. Young.
- Aki, K., & Richards, P. (2002). Quantitative Seismology. 2nd ed Sausalito.
- Ambraseys, N. (1962). Data for the investigation of the seismic sea waves in the Eastern. Bull. Seis. Soc. Amer., 52(4), 895-913.
- Aránguiz, R., Catalán, P., Cienfuegos, R., Gonzalez, G., Gubler, A., Urra, M., Zelaya, C. (2014). Guía para la Estimación de Peligro de Tsunami. Proyecto SATREPS Tsunami, 51.
- Argüello, G. (2016). W PHASE INVERSION ANALYSIS AND TSUNAMI SIMULATION FOR TSUNAMI WARNING FOR LARGE EARTHQUAKE ( $M_w > 7.0$ ) IN NICARAGUA. Managua.
- Aroyo, M. (2015). Nueva propuesta de zonificación sísmica en América Central y análisis de sensibilidad en los resultados de amenaza. Madrid.
- Àvila.G., C. (2014). GUÍA METODOLÓGICA PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y
- Borrero, J., Kalligeris, N., Lynnet, P., Fritz, H., Newman, A., & Convers, J. (2014). Observations and Modeling of the August 27, 2012 Earthquake and Tsunami affecting El Salvador and Nicaragua. Springer Base.
- Cabrera, A. (2018). Tsunami Characteristics of outer-rise Earthquakes along the pacific coast of Nicaragua - A Case study for the 2016 Nicaragua Event-. Managua, Nicaragua.: MEE16718.
- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordaz, S., Reinoso, A., Barbat, B., & Carreño, T. (2008). AMENAZA POR TSUNAMI EN MIRAMAR. Managua.

- Cardona, O., Yamín, L., Bernal, G., Ordas, M., Reinoso, E., Barbat, A., & Carreño, M. (2012). MODELOS DE EVALUACIÓN DE AMENAZAS NATURALES Y SELECCIÓN.
- Castillo. (2017). Geología de la Región Pacífica de Nicaragua. Managua: – ISSN 2164-4268.
- CENAPRED. (2005). Centro Nacional de Prevención de Desastres. México.
- CENEPRED. (2014). MANUAL Para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales.
- Centeno, L., Cuadra, R., Acevedo, L., Gutierrez, L., & Molina, L. (s.f.). Educación en Gestión del Riesgo. Managua.
- Espín, R. (2012). La Física de los Tsunamis.
- Fernandez, M., Molina, E., Havscov, J., & Atakan, K. (2000). Tsunamis and Tsunami Hazards in Central America.
- Gilbert, F. (1970). Excitation of the Normal Modes of the Earth by Earthquake Source. Geophysical Journal International , Volumen 22. California.
- González, F. (2011). EVALUACIÓN DE AMENAZA POR TSUNAMI. Bogotá.
- Goto, C. O. (1997). TIME Project: Numerical Method of Tsunami Simulation with the Leap-Frog Scheme. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Manuals and Guides 35, Paris.
- Güendel, F., & Protti, M. (1998). Sismicidad y sismotectónica de América Central. Física de La Tierra.
- Gusiakov, K. (2016). TSUNAMI HISTORY - RECORDED. Russia.
- Hanks, T., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. Geophys.
- Harlow, H., & White, R. (1985). Shallow earthquakes along the volcanic chain in Central America: Evidence for oblique subduction, Earthquake Notes.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. Quinta edición. México: ISBN edición anterior: 978-970-10-5753-7.
- Imamura. (1942). History of Japanese tsunamis. Kayo-No-Kagaku (Oceanography). Japón.
- Imamura, F. S. (1993). Estimate of the Tsunami Source of the 1992 Nicaraguan Earthquake from. Tokyo.
- Imamura, F., & Yalciner, A. (2006). TSUNAMI MODELLING MANUAL (TUNAMI model). Japón.
- INETER. (2019). Boletín Sismológico, Vulcanológico y Geológico. Dirección General de Geología y Geofísica. Managua: Apdo.2110.
- Linsley, R; Franzini, B; (1979) Water Resources Engineering Third Edition. Mcgraw-Hill Series in Water Resources Engineering.
- Kajiura, K. (1963). The leading wave of tsunami, Bull. Earthq. Tohoku.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes. Geophys.
- Kanamori, H., & Brodsky, E. (2004). The Physics of Earthquakes. Phys. 67 1429–1496.
- Koshimura, S. (2009). DEVELOPING FRAGILITY FUNCTIONS FOR TSUNAMI DAMAGE ESTIMATION USING NUMERICAL MODEL AND POST-TSUNAMI DATA FROM BANDA ACEH, INDONESIA. Tohoku.
- Koshimura, S. (2009) TUNAMI-CODE, Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami, JST-JICA Perú Project, Disaster Control Research Center, Tohoku University.
- Lana, X., & Correig, A. (1981). Determinación de la longitud de falla y velocidad de ruptura. Barcelona.
- Leeds, D. (1974). Catalog of Nicaraguan Earthquakes . Am., 64, 1153- 1158.
- Levin, B., & Nosov, M. (2009). Physics of Tsunamis. Russia.

- Lida, K. (1963). Magnitude, energy and generation mechanisms of tsunamis and a catalogue of.
- Mansinha, L., & Smylie, D. (1971). The displacement Fields of Inclined Faults: Bulletin of the Seismological Society of America.
- Minster, J., & Jordan, H. (1978). present-day plate motions. J.G Res., 83, 5331 - 52554.
- Molina, E., Marroquín, G., Escobar, J., Talavera, E., Rojas, W., Climent, A., Lindholm, C. (2008). PROYECTO RESIS II. Evaluación de la Amenaza Sísmica en Centroamérica.
- Montas, J., Labour, F., & Adans, A. (2012). PROGRAMA DE PREVENCIÓN DE DESASTRES Y GESTIÓN DE RIESGOS. Santo Domingo, Republica Dominicana.
- Niemeyer, H. (1999). APUNTES DE GEOLOGIA ESTRUCTURAL. Antofagasta.
- Okada, Y (1992) Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space, Bull. Seismol. Soc. Am. 82(2), 1018 -1040.
- Papadopoulos, G., & Imamura, F. (2001). A proposal for a new tsunami intensity scale. In: Proceedings of International Tsunami Symposium. Seattle, U.S.A., 569-577.
- Rojas, W. (1993). Catálogo de sismicidad histórica y reciente de América Central. Desarrollo y Análisis Tesis de Licenciatura en Geología, Universidad de Costa Rica.
- Sanches, E., Puentes, M., & Morales, R. (2013). Estudio de la Amenaza por Tsunami y Gestión del Riesgo en el Litoral Pacífico Colombiano. San Andres de Tumaco: ed.Dimar.
- Sakate, K. (2014). Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian ocean tsunami.
- Satake, K. (1994). Mechanism of the 1992 Nicaragua tsunami earthquake. En GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 21 (pág. No.23). Michigan: PAGES 2519-2522.

- Segura, F. (2008). Algunas características de la subducción frente a Nicaragua. UNAN-Managua.
- Segura, F. (2013). Reseña de la sismicidad en Nicaragua. Managua.
- Segura, F. (2016). Reseña de la sismicidad en Nicaragua con énfasis en la Depresión Nicaragüense. Managua.
- Segura, F & Rojas, W. (1987). Amenaza sísmica para el Centro de la ciudad de Managua Nicaragua.
- Shipley, T., & Moore, G. (1990). Sediment accretion, subduction, and dewatering at the base trench sople off Costa Rica: A seismic reflection view of the décollement, - Geophys. Res., 21.
- Shuto, N. (1993). Tsunami intensity and disaster. In: Tsunamis in the World. S.Tinti, . Kluwer Academic Publisher, Dordrecht.
- Sieberg, A. (1927). Geologische, physikalische und angewandte Erdbeben Kunde. Verlag von Gustav Fischer, Jena,.
- SINAPRED. (2009). AMENAZAS Y RIESGOS NATURALES DE NICARAGUA. Managua.
- SINAPRED, & INETER. (2019). Manual Municipal para la Elaboración de Mapas Comunitarios de Amenaza de Tsunami. Managua.
- SINAPRED, INETER, UNAN-Managua, & otros. (2017). LEVANTAMIENTO CARTOGRÁFICO EN EL DEPARTAMENTO DE MATAGALPA PARA ACTUALIZAR MAPA MULTIAMENAZA. Managua.
- Tanioka, Y., & Argüello, G. (2017). Method to Determine Appropriate Source Models of Large Earthquakes Including Tsunami.
- Tanioka, Y., Grillo, U., & Argüello, G. (2019). Pronóstico de inundación de tsunami casi en tiempo real para América Central: estudio de caso del terremoto de tsunami de Nicaragua en 1992. Managua.
- Tristan, J. (1916). The Costa Rica Earthquake of february 27, 1916 Bull. Seism. Soc. Am. V6, pp. 232-235.

- UNESCO. (2004). NOMENCLATURA PARA LOS CAMPOS DE LAS CIENCIAS Y LAS TECNOLOGÍAS.
- Washington, D. (1993). Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado.
- Watanabe, H. (1963). Method of determination of tsunami magnitude and its application to.
- Wiemer, S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. Seismol. Res. Lett., 72, 3, 373-382.
- Wiemer, S., & Zuniga, R. (1994). ZMAP - a software package to analyze seismicity, EOS, Transactions, Fall Meeting. AGU, 75, 456.
- Winckler, P. (2016). Diplomado en Investigación para la Reducción del Riesgo de Desastres de Origen Natural. Santiago, Chile.
- Yamamoto, M., & Aliaga, B. (2008). Comisión Oceanográfica Intergubernamental. Preparación para casos de tsunami – Guía informativa para los planificadores especializados en medidas de contingencia ante catástrofes. Manuales y guías de la COI N° 49. UNESCO (español, francés, inglés). Francia: Ed. Rachel Dahl.
- Yanagisawa, H. (2018). Lecture notes on Numerical simulation of tsunami inundation and its application, IISEE/BRI.

### **Sitios web**

- [https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data/](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/)
- <https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=srt>
- <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0005ddn/executive>
- <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp0005ddn/moment-tensor>
- ineter.gob.ni. (s.f.). Obtenido de <https://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/tsunami/peligro/peligro.html>
- NTL / ICMMG. (s.f.). Obtenido de [http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu\\_db.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml).

## CAPITULO XIII

### Anexo

#### **Anexo 1.** Edificaciones de la costa de Pochomil

En las siguiente Foto 3 se muestra edificaciones de la costa de Pochomil y la Foto 4 muestra la zona escolar recomendada para usarse como albergue en caso de un tsunami.



*Foto 3.* Edificación considerada en estado Buena.



*Foto 4.* Escuela El Madroñal (Zona segura).

La Foto 5 muestra edificación catalogada como Muy frágil y la Foto 6 muestra una talud, con edificación de alquiler considerada Muy buena.



*Foto 5. Edificación Muy frágil.*



*Foto 6. Muestra una talud y sobre ella edificaciones clasificadas Muy buena.*

La siguiente Foto 7 muestra una parte de las edificaciones consideradas frágiles que corresponde a los sitios de recreación en la costa, y la Foto 8 corresponde a las bocinas que alarman a la población en caso de tsunami.



*Foto 7.* Bares y restaurantes en la costa de Pochomil.



*Foto 8.* Sistema de Alerta Temprana en caso de tsunami.

**Anexo 2.** Actividades de Mitigación en la costa de Pochomil.

La siguiente Foto 9 corresponde al día 19 de marzo, del presente año, en las actividades de preparación en caso de tsunami en la costa de Pochomil.



Foto 9. Actividades de preparación en caso de tsunami en la costa de Pochomil, 19-03-20.

El día 1 de octubre del presente año, se desarrolló “EL EJERCICIO NACIONAL DE PREPARACIÓN Y PROTECCIÓN DE LA VIDA EN SITUACIONES DE MULTIAMENAZAS”. La cual consistió que un sismo de magnitud de 6.8  $M_w$  en la escala abierta de Richter y de 40 km de profundidad, ocurriría en el litoral del pacífico afectando a las comunidades localizadas en las costas del pacífico nicaragüense.

La actividad no se desarrolló en Pochomil, pero si se realizó en Masachapa, ver Foto 10.



Foto 10. EJERCICIO NACIONAL DE PREPARACIÓN Y PROTECCIÓN DE LA VIDA EN SITUACIONES DE MULTIAMENAZA, 1-10-20. Realizado en Masachapa.

