



SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC

COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

Evaluación de peligro por tsunami en las costas de Manzanillo, Colima

**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
CENAPRED**

**COORDINACIÓN NACIONAL DE PROTECCIÓN CIVIL
CNCP**

SECRETARÍA DE SEGURIDAD Y PROTECCIÓN CIUDADANA

Elaboró:

Emmanuel Ramírez Álvarez

Jefe de Departamento de Investigación Aplicada a Riesgos Sísmicos

Subdirección de Riesgos Sísmicos

Ciudad de México, febrero 2024





SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC

COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
RESUMEN	3
Abstract.....	3
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Alcances y objetivo.....	6
2. Distribución de la ocurrencia	7
2.1 Caracterización de las fuentes	8
2.2 Relación G-R.....	9
2.3 Relación G-R Modificada	10
2.4 Sismo característico.....	11
3. Modelo de propagación de tsunamis.....	13
3.1 Generación y modelado de tsunamis	13
3.2 Resultados de las simulaciones.....	15
4. Resultados	16
5. Conclusiones	18
Referencias.....	19
Referencias web.....	20
Documentos de interés.....	20





RESUMEN

Se presentan los resultados del análisis probabilístico de peligro por tsunami en las costas del puerto de Manzanillo, Colima, México. Para ello, se realizó un análisis exhaustivo de la sismicidad regional, utilizando todas las fuentes de información sobre sismos y tsunamis disponibles, usados como base de los análisis probabilísticos. Estas metodologías proporcionan procedimientos clave para comprender el peligro potencial por tsunami en costas mexicanas.

Para la realización de este estudio, se utilizaron los análisis Gutenberg-Richter y de temblor característico, para cada una de las fuentes seleccionadas con posibilidad de generar el fenómeno geofísico de tsunami. A partir de los resultados, se efectuaron simulaciones numéricas de generación, propagación y altura de ola, las cuales, combinadas con las probabilidades de generación de tsunamis, proporcionaron parámetros para las estimaciones cuantitativas del peligro en la zona de estudio representado en curvas de tasa de excedencia. Las curvas de tasa de excedencia de altura de tsunami permiten determinar áreas propensas a inundación en el puerto de Manzanillo, así como apoyo en la elaboración de planes de preparación, emergencia y rutas de evacuación ante tsunamis.

PALABRAS CLAVES: Evaluación probabilista; Altura de olas; Tsunami.

Abstract

The results of the probabilistic analysis of tsunami hazard on the shores of the port of Manzanillo, Colima are presented. To this end, a comprehensive analysis of regional seismicity was carried out, using all available sources of information on earthquakes and tsunamis available, and used as a basis for probabilistic analyses which offer key procedures to understand the potential tsunami hazard on the Mexican coasts.

In this study, Gutenberg-Richter analysis and characteristic-earthquake model were used for each of the selected tsunamigenic earthquake sources. Based on the results, numerical simulations of wave generation, propagation and tsunami height were carried out, which, combined with the tsunami generation probabilities, provided parameters for quantitative estimates of tsunami hazard in the study area, this represented as exceedance rate curves. Tsunami height exceedance rate curves allow to determine flood-prone areas in the port of Manzanillo, Colima, Mexico, as well as, to support the development of preparedness-emergency plans and tsunami evacuation routes.

Key Words: Probabilistic evaluation; Wave height; Tsunami.

1. INTRODUCCIÓN

El término tsunami es japonés (tsu: puerto, nami: ola); internacionalmente se usa para designar el fenómeno que en español se denomina maremoto y el cual es una ola o un conjunto de olas generado por el repentino desplazamiento vertical de una columna de agua (Cenapred, 2005).





SEGURIDAD

SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA



CNPC

COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL



CENAPRED

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

Los tsunamis son un fenómeno natural poco frecuente, sin embargo, en los últimos 100 años alrededor del mundo, 58 de ellos han cobrado más de 260 000 vidas, con un promedio de 4 600 por desastre, superando a cualquier otro riesgo natural. El tsunami más mortífero de la historia ocurrió en diciembre de 2004 en el Océano Índico consecuencia de un sismo Mw 9.0 frente a las costas de Sumatra, se estima que este causo el deceso de 227 000 personas en 14 países. En marzo de 2011 en frente a las costas de Japón se registró un sismo Mw 8.9, el cual causo el deceso de unas 19 000 personas (Pesaresi, M., et al, 2017).

Un tsunami, es una serie de ondas de período largo que se producen por una perturbación a gran escala en un tiempo muy corto, generadas en el fondo del océano. Puede arribar a las costas cercanas con gran altura y provocar efectos destructivos: pérdida de vidas y daños materiales, por lo tanto, el entendimiento de este tipo de fenómenos es de particular importancia. Estas series se desplazan a una velocidad de 700 km/h con longitudes de onda muy extensas, por lo tanto, pueden afectar costas muy alejadas del sitio de origen.

El modelado de tsunami incluye, al menos, tres diferentes etapas:

- La generación.
- Propagación o tiempo de viaje de la ola.
- La altura máxima del impacto de la ola y máxima inundación (run up).

Los tsunamis son producidos por diferentes tipos de agentes perturbadores, entre los que destacan; los sismos en zonas de subducción, los procesos de remoción de masas, las erupciones volcánicas en el fondo del mar y la caída de meteoritos en el océano (Cenapred, 2006).

Las erupciones en el fondo del mar son abundantes y frecuentes, particularmente en las dorsales oceánicas. Sus efectos dependen del tamaño de la erupción y no son frecuentes generadores de tsunamis. La mayoría de los volcanes activos en el fondo oceánico se localizan en el océano Pacífico, y aunque también existen algunos en el Atlántico y en el mar Caribe, se estima que su peligrosidad es muy relativa como para generar tsunamis (UNESCO, 2005).

La principal causa de tsunamis son sismos fuertes producto de la ruptura de la corteza a lo largo de las zonas de subducción y donde se desplazan las placas tectónicas en el fondo marino, las cuales ocasionan una deformación del fondo marino que producen que el agua del océano pierda su dinámica habitual y sea impulsada fuera del borde costero. Es importante señalar que no todos los sismos generan tsunamis, sino sólo aquéllos que ocurren bajo el fondo marino y son capaces de deformarlo (UNESCO, 2005).

La interacción de las olas de los tsunamis con la costa es muy compleja, depende de la altura de las olas en mar abierto, la batimetría, la pendiente del fondo marino, la refracción, la reflexión, la configuración del contorno de la costa y el atrapamiento de las olas en ese contorno. Todos estos factores influyen para que sea difícil hacer una evaluación del comportamiento del arribo de las olas de un tsunami, ya que esto puede variar en distancias cortas (Cenapred, 2005).

Por su origen, los tsunamis se clasifican, de la siguiente manera:



- Tsunamis locales. El lugar de arribo a la costa está muy cercano o dentro de la zona de generación del maremoto; por tiempo de desplazamiento: a menos de una hora.
- Tsunamis regionales. El litoral afectado está a menos de 1 000 km, o a pocas horas de viaje de la zona de generación.
- Tsunamis lejanos (Remotos, transpacíficos o teletsunamis). El sitio de arribo está muy alejado, a más de 1 000 km de distancia de la zona de generación, a aproximadamente medio día o más de viaje.

La gran mayoría de los tsunamis son una consecuencia de los sismos que ocurren en el contorno costero, siendo el océano Pacífico donde se han presentado en mayor número de veces, esto debido a las condiciones tectónicas que se presentan en este lugar, algunos ejemplos son tsunamis originados en Chile, Alaska, México y otros países en la región que han impactado en las costas del Pacífico.

El territorio nacional se localiza en el Cinturón Circumpacífico, considerada como la región con mayor sismicidad de todo el mundo (Ramírez, 2020). En nuestro país, el choque de las placas oceánicas de Cocos y Rivera contra la placa continental norteamericana genera sismos de gran magnitud con tiempos de recurrencia relativamente cortos y con alto potencial tsunamigénico (ver **Figura 1.1**).

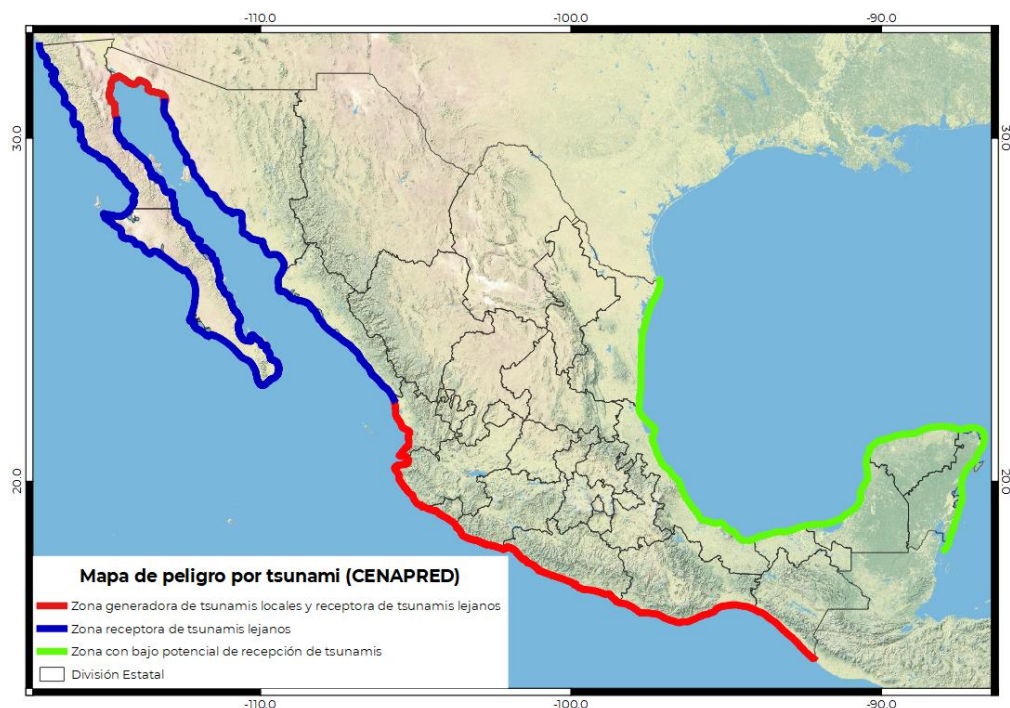


Figura 1.1 Mapa de peligro por tsunami (Ramírez, 2020).

El Pacífico mexicano, cuenta con una zona de subducción donde se generan sismos de gran magnitud con cierta frecuencia, generando el elevado riesgo sísmico y por tsunami para la población asentada en el litoral de la costa pacífica mexicana. Sin embargo, es importante aclarar que no todos



los sismos pueden ocasionar un tsunami, la generación de este fenómeno depende de distintos factores como la magnitud, profundidad, ubicación y el tipo de movimiento de la falla (Figura 1.2).

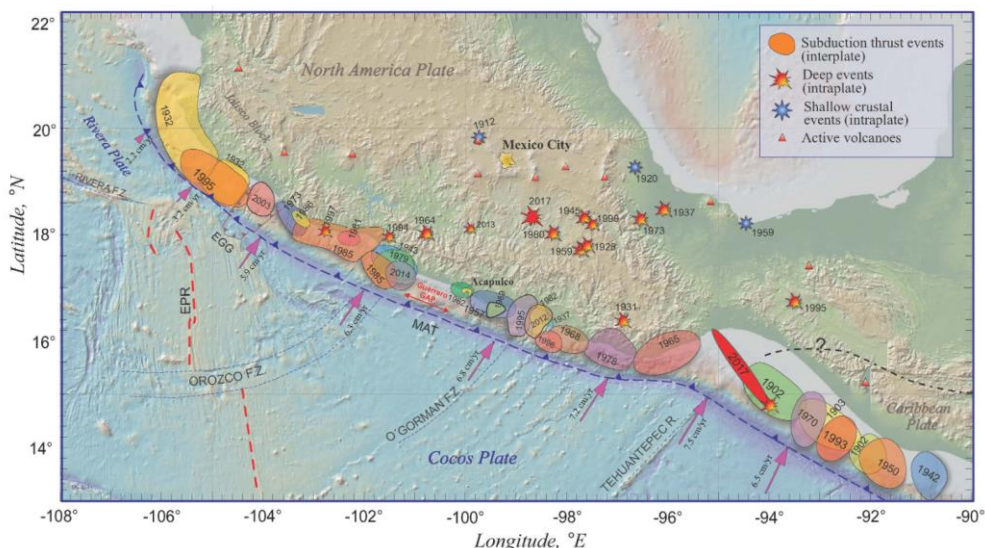


Figura 1.2 Cien Años de Sismicidad en México (Kostoglodov, V. 1999, UNAM)

En la práctica existen dos métodos para caracterizar el peligro por tsunamis, el primero de ellos es el cálculo de la amenaza usando el método determinista en el cual se considera el evento máximo creíble (Maximum Credible Earthquake, MCE, por sus siglas en inglés) que puede afectar a una área o zona de interés.

La segunda es la evaluación probabilística del peligro de tsunami también conocida como PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis), que se ha desarrollado para cuantificar la amenaza de una región expuesta a este fenómeno para posteriormente incluir esta información en los análisis de riesgo de tsunami para distintos períodos de retorno de interés "Tr" y que pueden extenderse desde algunos hasta cientos e incluso miles de años, para los cuales los catálogos de tsunamis no cuentan con información.

Estos enfoques se usan para obtener el estudio de peligro por tsunamis, para el puerto de Manzanillo, Colima.

1.1 Alcances y objetivo

El objetivo de este estudio es obtener la probabilidad de exceder umbrales de altura de tsunami en el puerto de Manzanillo, Colima.

Dentro de los alcances de este estudio se realizó:

- La recopilación de información libre topográfica y batimétrica del Pacífico mexicano.



- Generación de un catálogo sintético que contemple las características de cada una de las fuentes analizadas.
- El análisis Gutenberg-Richter (G-R), para cada fuente seleccionada con posibilidad de generación de tsunami.
- El análisis de temblor característico, para cada fuente seleccionada con posibilidad de generación de tsunami.
- Obtención de curvas de recurrencia por tsunami para el puerto de Manzanillo.

2. Distribución de la ocurrencia

Los análisis probabilísticos de eventos naturales en una región son altamente demandantes debido a la recolección y generación de parámetros que se requieren para caracterizar las amenazas, pero son un componente clave de cualquier evaluación integral de peligros.

Para los análisis de riesgos de tsunamis se han basado en el pasado en modelos de tipo determinista o de escenarios únicos. Sin embargo, los análisis probabilistas deben considerar diversas evaluaciones geofísicas debido a las diferentes causas que generan los tsunamis (terremotos, deslizamientos, actividad volcánica, eventos meteorológicos, impactos de asteroides) con tiempo variable de ocurrencia (Grezio et al., 2017).

En este estudio nos enfocamos solamente en los tsunamis generados por eventos sísmicos. Los terremotos o sismos fuertes en las zonas de subducción, son la causa principal de los tsunamis más grandes. Si bien, no todos los sismos producen tsunamis, en México los principales tsunamis registrados tienen su origen en el fenómeno geológico sísmico de las zonas de subducción (Figura 2.1).

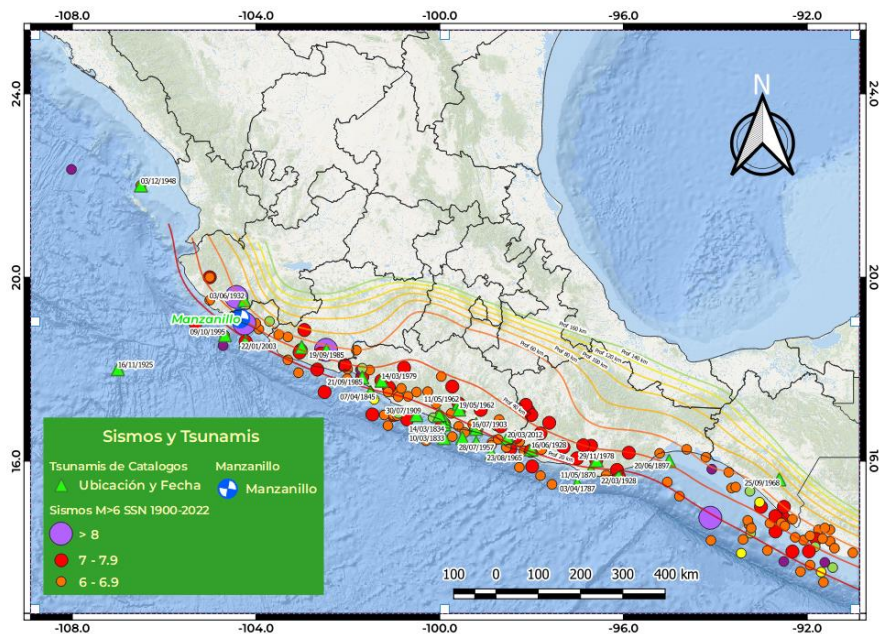


Figura 2.1 Sismos de subducción con $M > 6$ en México de 1900 a 2023 registrados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN-UNAM), y principales tsunamis de catálogos disponibles (Farreras y Sánchez, 1991, Cenapred, 2005).





Los análisis probabilísticos de peligro por tsunamis están estrechamente relacionados con el análisis sísmico probabilista (Esteve, 1967; Cornell, 1968), y se están convirtiendo en una herramienta que se usa con mayor frecuencia, no obstante, también involucra retos como, la clasificación de los eventos, los periodos de retorno seleccionados, las fuentes con potencial generador de tsunamis, así como los relacionados con los análisis probabilísticos y las incertidumbres que estos ostentan.

El Análisis Probabilístico de Peligro por Tsunami PTHA (por sus siglas en inglés) tiene como objetivo evaluar la probabilidad de que una determinada "medida de intensidad" de peligro de tsunami sea superado en un determinado periodo de retorno, estas medidas pueden ser la altura de tsunami en la línea de costa o las zonas de inundación.

El PTHA se basa en simulaciones numéricas de tsunamis a partir de un modelo de fuente sísmica probabilística. Debido a que las incertidumbres para predecir la ocurrencia de un sismo son muy elevadas se hace uso del análisis probabilístico de peligro sísmico para tomar en cuenta las distintas incertidumbres involucradas.

2.1 Caracterización de las fuentes

Un paso fundamental en el estudio del análisis de peligro sísmico probabilista PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Analysis), es conocer la frecuencia y severidad con la que se podrían presentar los eventos sísmicos dentro de una misma fuente. Para esto, se puede considerar que los sismos tienen la misma probabilidad de ocurrencia dentro de la geometría de la fuente, y si la recurrencia (magnitud vs. frecuencia), observada en los catálogos sísmicos, es suficiente para predecir los eventos en cualquier lapso de tiempo o se empleara un catálogo sintético.

Como primer paso se requiere contar con información de las fuentes sísmicas que contribuyen al peligro sísmico con potencial generador de tsunamis para las zonas de estudio, en términos de su geometría y sismicidad.

Los criterios para determinar los límites de las fuentes sísmicas incluyen revisiones detalladas de información sobre la configuración tectónica, fallas activas, características focales y/o patrones de fallamiento y catálogos de sismos históricos e instrumentales que permitan conocer las características de los eventos que rigen la sismicidad en la zona de estudio (Zúñiga et al., 1997).

En este estudio se utilizó la información de la regionalización sísmica de México y la geometría de cada una de las fuentes seleccionadas en la zona de subducción del Pacífico mexicano identificadas como SUB-1, SUB-2, SUB-3 y SUB-4 propuestas por Zúñiga et al, 2017, y que toman en consideración los catálogos disponibles, así como homogenización de magnitudes para la obtención de los coeficientes **a** y **b**.

Para cada fuente sísmica, se generó un catálogo sintético, que toma en consideración las características antes mencionadas, para obtener la frecuencia anual de recurrencia y la tasa de excedencia de magnitudes, utilizando la relación Gutenberg - Richter modificada.



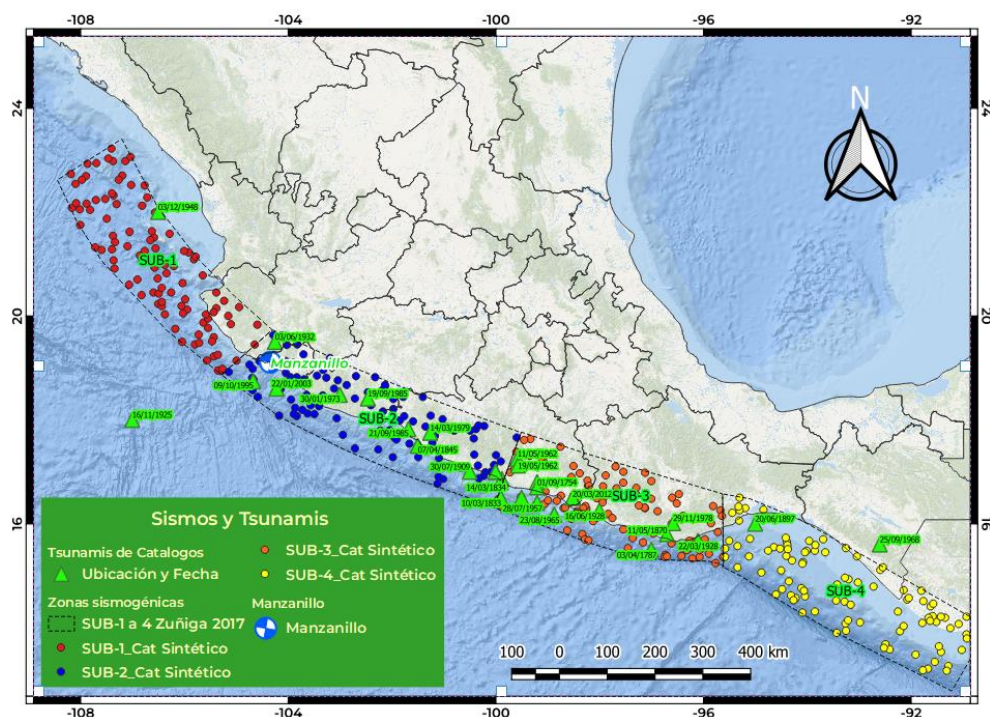


Figura 2.2 Clasificación sismogénica de la zona de subducción mexicana (Zúñiga *et al.*, 2017) y catálogo sintético.

2.2 Relación G-R

Cuando se ha definido la geometría de la fuente, el siguiente paso es evaluar el tamaño de los sismos que la fuente puede generar y su ocurrencia con el paso del tiempo. Para determinar su sismicidad se hace uso de catálogos de registros sísmicos (instrumentales e históricos) de eventos ocurridos sobre la geometría de la fuente anteriormente definida, y de información sobre tectónica y paleosismología de la fuente. Una hipótesis importante de la cual parten los estudios para definir la sismicidad de una fuente es que la relación de recurrencia sísmica (magnitud vs frecuencia) obtenida a partir de datos observados en el pasado, es correcta para predecir la sismicidad futura de la fuente. (Leonardo, M., 2013).

Uno de los modelos de recurrencia sísmica más comúnmente usados, es el modelo propuesto por Gutenberg – Richter (1944), quienes estudiaron datos de sismos ocurridos en el sur de California durante un periodo de tiempo. Ellos organizaron los datos de acuerdo al número de sismos que excedían diferentes magnitudes presentadas durante un determinado intervalo de tiempo y dividieron el número de excedencias de cada magnitud con respecto a dicho intervalo, obteniendo de esta manera una tasa media anual de excedencia λ_m , de un sismo de magnitud. Cuando graficaron el logaritmo de la tasa anual de excedencia de los sismos ocurridos en el sur de California, observaron una relación lineal. El resultado del modelo de recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter se expresa como:

$$\log \lambda_m = a - bm$$



Donde λ_m es la tasa anual de excedencia de la magnitud m , el coeficiente a representa el logaritmo del número total de sismos que tienen magnitud mayor o igual a cero, el coeficiente b es un parámetro que describe la probabilidad relativa de ocurrencia de sismos de magnitudes altas y bajas. Los coeficientes a y b se obtienen generalmente mediante la regresión de la base de datos correspondientes a la sismicidad de la fuente de interés. El modelo estándar de Gutenberg – Richter es graficado en la figura 2.3, donde se observa que a medida que el valor de b aumenta o disminuye, varía la pendiente de la línea recta que define la tasa de excedencia de sismos de diferentes magnitudes.

2.3 Relación G-R Modificada

Debido a que el modelo de recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter fue realizada para una zona en particular, se deben realizar las adaptaciones necesarias para nuestra región de estudio, una de estas modificaciones es la relación G-R Modificada. La regionalización sísmica de la República Mexicana está dividida por la tectónica y por la historia instrumental de los sismos registrados (Zúñiga et al., 1994, 1997, 2010, 2017). Cada una de estas fuentes genera temblores a una tasa constante por unidad diaria. La actividad de la i -ésima Fuente sísmica se especifica en términos de tasa de excedencias de las magnitudes $\lambda_i(M)$, que ahí se generan. La tasa de excelencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se genera en una fuente los temblores con magnitud superior a una dada (MDOC-2015).

La sismicidad de las fuentes gobernadas por la relación Gutenberg-Richter modificada. Para la mayor parte de las fuentes sísmicas la función $\lambda(M)$ es una versión modificada de la relación de G-R. En estos casos la sismicidad queda descrita de la siguiente manera (Cornell et al., 1969):

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta m} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}}; \quad M_0 \leq m \leq M_u$$

Donde

M_0 , es la magnitud mínima relevante

M_u , qué es la máxima magnitud que puede generarse en cada fuente

λ_0 , β y m , son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas.

Para el factor M_0 se consideraron sismos con magnitud $M > 6$, y para $M_u = 8.6$, que es la magnitud estimada del evento histórico del 28 de marzo de 1787 (sismo de San Sixto), en los límites de Oaxaca y Guerrero; el cual es considerado como el terremoto histórico de mayor magnitud en México (Cenapred, 2005, Ramírez E., 2020). Estos parámetros diferentes para cada fuente se estiman por procedimientos estadísticos bayesianos (Rosenblueth et al., 1989, Arboleda et al., 1993) que incluyen información sobre regiones tectónicamente similares a las de nuestro país más información experta especialmente sobre el valor de M_u . En la Figura 2.3 se muestra de excedencia para cada una de las fuentes seleccionadas.



2.4 Sismo característico

La historia sísmica a lo largo de la zona de subducción de México durante los últimos 180 años muestra que las regiones de Tehuantepec y Michoacán no han experimentado un gran terremoto en este siglo y, tal vez, ninguno en el siglo pasado. Estas dos regiones pueden ser asísmicas o pueden tener periodos de recurrencia anormalmente grandes. Las regiones de Guerrero y Jalisco se destacan como brechas de alto potencial sísmico. La región de Ometepec (98.5°O) ahora debe considerarse una brecha sísmica desde que ocurrió el último gran terremoto hace unos 30 años.

El ML-GR y sus variantes estiman bastante bien las tasas de excedencia de magnitudes bajas en grandes regiones, pero pueden sobrestimar la tasa de recurrencia de sismos grandes. Lo anterior fue demostrado por Singh (1983) quien analizó datos desde 1963 hasta 1981 en relación con los sismos que ocurren en zona de subducción mexicana y demostró que cuando se extrapolan las tasas de excedencia de sismos pequeños para predecir la de sismos grandes, estas última se sobrestiman, debido a que sus valores se alejan de la curva calculada con el ML-GR.

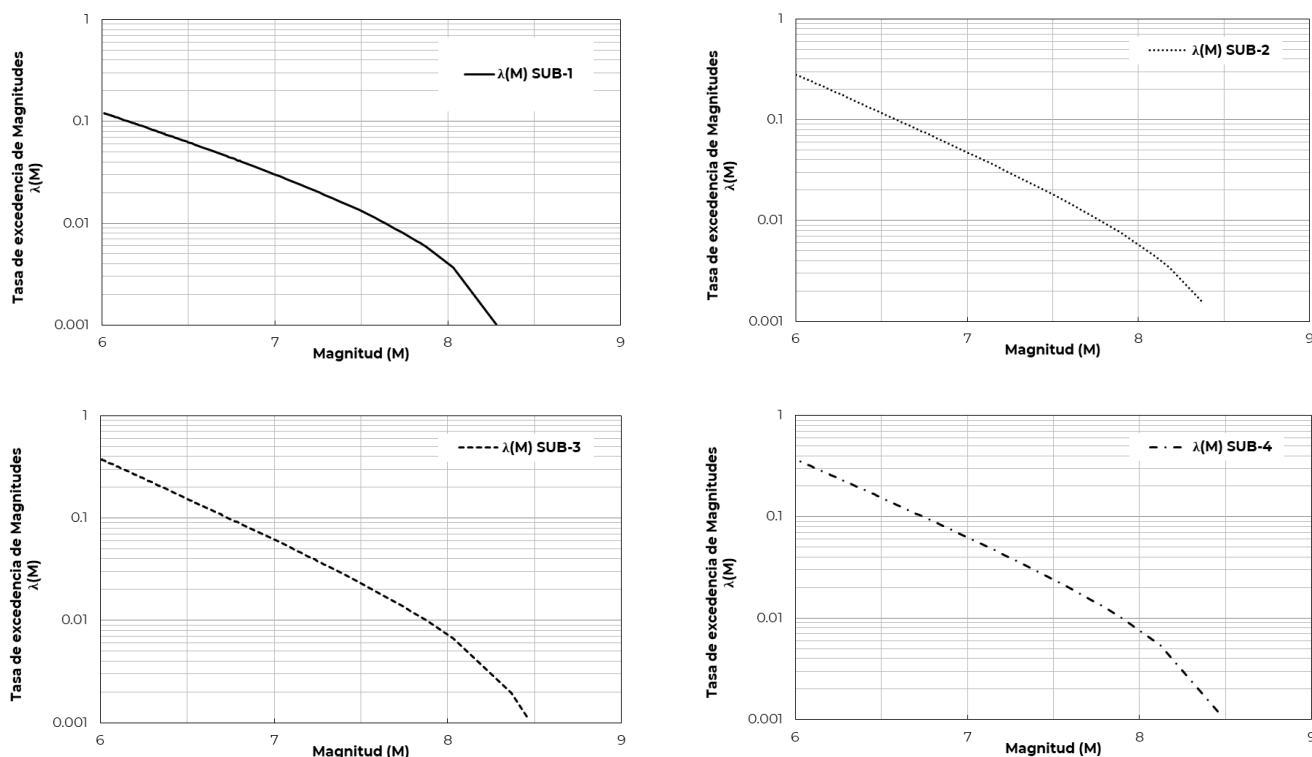


Figura 2.3 Tasa de excedencia de magnitudes $\lambda(M)$ con la relación G-R Modificada para cada una de las fuentes seleccionadas.

Los tiempos de repetición promedio observados de grandes terremotos ($M_s \sim 7.4$) en seis regiones a lo largo de la zona de subducción (este, centro y oeste de Oaxaca, San Marcos, Petatlán y Colima se



encuentran entre 32 y 56 años). La falta de periodicidad observada en otras regiones puede deberse a la incompletitud e inexactitudes del catálogo del siglo pasado y/o tiempos de repetición más grandes o irregulares de grandes terremotos.

Dado que los tiempos de ocurrencia entre eventos sísmicos de gran magnitud (7.0 – 8.4) que se generan en la costa de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Colima, Jalisco y Michoacán no presentan una distribución exponencial, debido a que solo se generan sismos de ciertas magnitudes en tiempos de ocurrencia constantes (sismo o temblor característicos); es necesario incorporar un modelo de temblor característicos en el análisis de peligro sísmico para poder determinar el valor esperado de la magnitud del próximo evento en función del tiempo transcurrido desde la última ocurrencia de un temblor característico, Jara y Rosenblueth (1998), proponen la siguiente expresión,

$$E(M|T00) = \max[M_0, D + F \ln(T00)]$$

Donde $E(M|T00)$ es el valor esperado de la magnitud del próximo evento, dado que han transcurrido $T00$ años desde la última ocurrencia de un temblor característico de magnitud mayor o igual que M_0 (magnitud umbral); D y F son parámetros que definen como aumenta la magnitud con el tiempo transcurrido desde la última ocurrencia de un sismo característico. En el modelo del temblor característico la tasa de excedencia de magnitud, λ_M , cambia en función del tiempo y está dada por la ecuación,

$$\lambda_M = \lambda_0 \frac{1 - \Phi \left[\frac{M - E(M|T00)}{\sigma_M} \right]}{\left\{ \Phi \left[\frac{M_U - E(M|T00)}{\sigma_M} \right] - \Phi \left[\frac{M_0 - E(M|T00)}{\sigma_M} \right] \right\}}$$

Donde $\lambda_0 = 1/T_0$; T_0 es el tiempo medio entre eventos con magnitud $M > M_0$; σ_M es la desviación estándar de la magnitud de los sismos característicos y $\Phi[\cdot]$ es la distribución normal estándar.

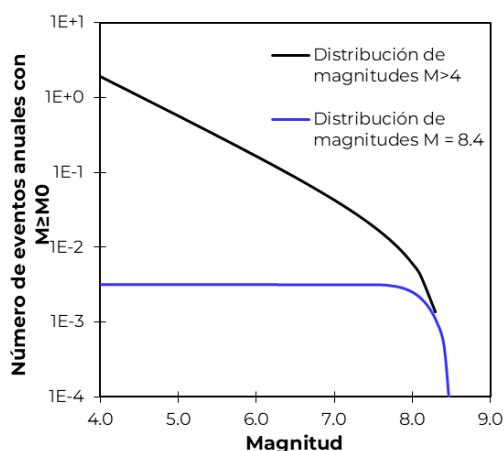


Figura 2.4 Curvas de amenaza calculada por la tasa de excedencia $v(h)$ del parámetro de intensidad h para las costas del pacífico utilizando la información y parámetros de fuentes para un sismo característico.



Para la obtención de los parámetros necesarios para la generación de las curvas de recurrencia de magnitudes para el sismo característico en de las fuentes analizadas (Tabla 2.1), se han usado las presentadas en el MDOC-CFE 2015, dichos parámetros contemplan la sismicidad de cada fuente.

Tabla 2.1. Parámetros de fuente para considerar el temblor característico.

No.	Nombre	Med(T) (años)	σ_M	M_0	M_L
11	Subducción Chiapas	23	0.27	7	8.4
12	Subducción Brecha de Tehuantepec	70	0.27	7	8.4
13	Subducción Oaxaca Este	26	0.27	7	8.4
14	Subducción Oaxaca 1	32	0.27	7	8.4
15	Subducción Oaxaca 2	63	0.27	7	8.4
16	Subducción Oaxaca Oeste	84	0.27	7	8.4
17	Subducción Ometepe	23	0.27	7	8.4
18	Subducción San Marcos	82	0.27	7	8.4
19	Subducción Guerrero	35	0.27	7	8.4
20	Subducción Petatlán	48	0.27	7	8.4
21	Subducción Michoacán	22	0.27	7	8.4
22	Subducción Colima 1	46	0.27	7	8.4
23	Subducción Brecha de Colima	64	0.27	7	8.4
24	Subducción Jalisco	17	0.27	7	8.4
46	Bavispe	500	3.0	7.4	7.6

Con la información generada se ajustaron a las curvas de probabilidad de excedencia de magnitudes y las probabilidades de excedencia de alturas de ola, obtenidas en el la fase I (Ramírez E., 2020), de este proyecto.

3. Modelo de propagación de tsunamis

La simulación matemática puede modelar las características más importantes del desarrollo del tsunami y eventualmente los escenarios de inundación plausibles para el caso de poblaciones costeras. Utilizando la información de la sección anterior se generan modelos computacionales de tsunamis de los sismos propuestos con diferentes magnitudes $> M_0$.

3.1 Generación y modelado de tsunamis

El modelado de tsunami incluye, al menos, tres diferentes etapas:

- La generación de la dislocación cosísmica.
- Tiempo de viaje de la ola generada por la deformación del fondo oceánico.
- La altura máxima de ola, en la línea de costa de las ciudades seleccionadas, el modelado de la inundación con esta información se revisará en otro proyecto.

De acuerdo con lo anterior la selección de un método numérico para resolver el sistema de ecuaciones de gobierno debe realizarse teniendo en cuenta que éste pueda representar esas características.



La **magnitud de un tsunami** se puede medir de varias maneras: por la altura del runup, por la profundidad de la inundación o por la altura del tsunami en la costa. Para conocer dichos parámetros se debe considerar la condición inicial del evento sísmico que genera un desplazamiento de la superficie marina seguida del desplazamiento vertical (Ramírez E., 2020).

Para determinar el desplazamiento vertical cosísmico, se usa un modelo de deformación elástica de la fuente generadora, que asume la ruptura de un simple plano de falla rectangular (Okada, 1985). El modelo de Okada genera una geometría de deformación del suelo marino, obteniendo un desplazamiento uniforme del sólido sobre una superficie finita con los parámetros mencionados anteriormente. Esta deformación es utilizada solo como una aproximación, ya que raramente el suelo marino es plano y muchos de estos parámetros son promedios o datos obtenidos desde observaciones externas.

El desplazamiento medio de los bloques (dislocación) se calcula mediante la expresión propuesta por Allen and Hayes (2017) y que son similares a las de Hanks y Kanamori, 1979. Dicha expresión relaciona la magnitud M_w con el largo L , el ancho W , la dislocación d y el módulo de rigidez al cortante μ , utilizando un coeficiente de ajuste A . Se determinó las dimensiones de ruptura L y W de los sismos utilizados en cada una de las simulaciones realizadas en este proyecto con el software EasyWave.

EasyWave sigue el algoritmo computacional presentado en Kowalik y Whitmore (1991), utilizando las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas se resuelven en una cuadrícula escalonada de diferencia finita en coordenadas esféricas que implican un paso de tiempo explícito. Solo se considera la aproximación lineal, el algoritmo no calcula las inundaciones costeras y las ejecuciones detalladas directamente. En cambio, lleva la ola de tsunami hasta el límite de validez del modelo lineal de aguas poco profundas (generalmente, 20-50 metros de profundidad) y luego estima las acumulaciones con relaciones empíricas (por ejemplo, Chesley y Ward, 2006).

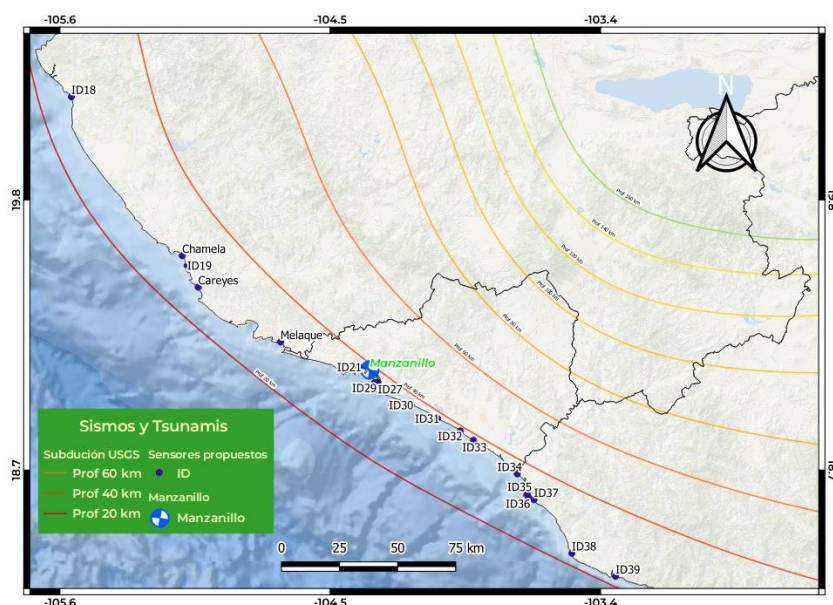


Figura 3.1 Los puntos azules indican la ubicación de los sensores hipotéticos propuestos para este estudio, y cercanos a la zona de del Puerto de Manzanillo, Colima.



3.2 Resultados de las simulaciones

EasyWave produce salidas 1D y 2D. Las series de tiempo de onda se pueden almacenar para cualquier ubicación dada en un formato de tabla de texto simple. Para el presente estudio, se obtuvieron los datos de tiempo estimado de llegada (ETA) y altura estimada de ola (EWH) para varios en el Pacífico Mexicano como se muestran en la figura 3.2, de forma general se obtuvo:

- Modelados de propagación del tsunami para diferentes sismos con potencial tsunamigénico en el pacífico mexicano.
- Tiempo estimado de llegada (ETA).
- Altura estimada de ola (EWH) para varios puntos del litoral mexicano.
- Comprobación de alturas de ola con registros históricos de mareógrafos y boyas DART en caso de existir.

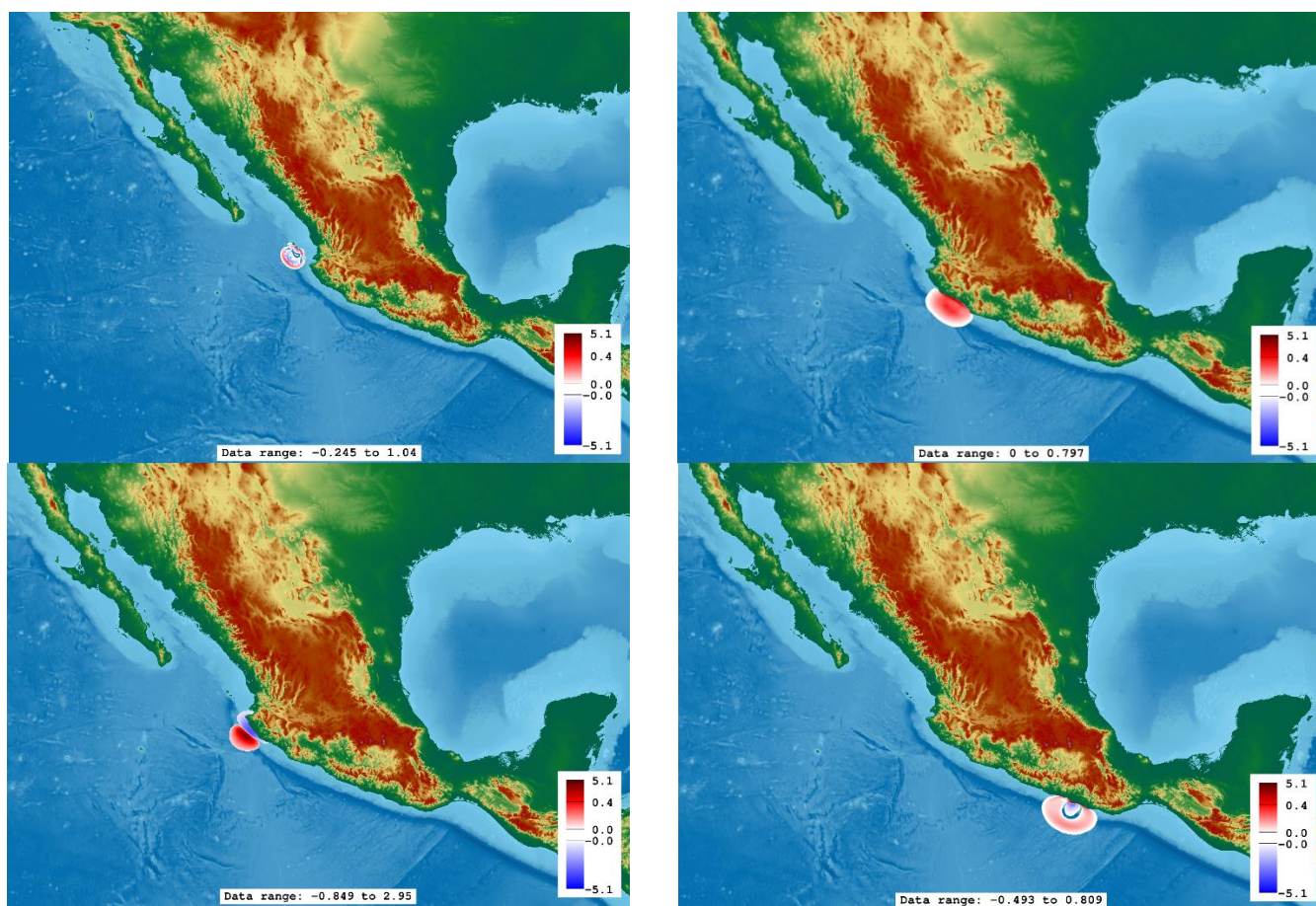


Figura 3.2 Resultados obtenidos de simulaciones de sismos hipotéticos en las costas del pacifico mexicano usando el software EASYWAVE, donde se muestra la perturbación de la columna de agua producto de la deformación cósmica del fondo marino, para un tiempo T de 0.0, 5.0, 10.0 y 15.0 min respectivamente.





De los eventos ya mencionados (aquellos cuya información referente al mecanismo focal es conocida), se seleccionarán algunos para proceder a realizar las simulaciones de propagación de la ola con la ayuda del software EasyWave, con el cual se obtiene la altura y tiempo de arribo de la ola.

Para reducir aún más la lista de eventos, primero, se seleccionaron los eventos más significativos, es decir, los de mayor magnitud y que a su vez, estuviesen distribuidos a lo largo de la zona de subducción mexicana, de tal manera que se pudiese abarcar lo más que se pueda de la misma; lo anterior debido a que facilitará la realización de las simulaciones faltantes.

Para esto se necesitó los modelos de elevación digital de la zona de estudio en coordenadas geográficas (Latitud, Longitud), descargados del portal web de INEGI y para la batimetría se utilizó la información del mapa ETOPO-1 del sitio web WorldWide Data, estos modelos permitieron realizar la malla en el área de influencia y así poder asignar las condiciones iniciales del tsunami, finalmente con estos resultados se pueden seguir planteando proyectos en otras áreas de interés en costas mexicanas, ya que pueden una herramienta importante en la investigación de los tsunamis y sus comportamientos en zonas costeras.

4. Resultados

El propósito de un Análisis Probabilístico de Peligro por Tsunami (PTHA) es encontrar la probabilidad de que se exceda un nivel de inundación I o altura de ola h , en una determinada ventana de tiempo y que se usa para conocer el peligro de tsunami, se expresa como una curva de peligro, que muestra la intensidad de excedencia del peligro en función de la probabilidad, a menudo expresada como una tasa de excedencia por año.

Dado que no todos los sismos producen tsunamis se requiere conocer las características en términos de desplazamiento (slip), el área de ruptura ($L \times W$) obtenidos con la expresión propuesta por Allen and Hayes (2017), se muestran en la Tabla 4.1, y de todos los parámetros que afectan la generación de los eventos estocásticos sísmicos tsunamigénicos considerados en la relación G-R y sismo característico.

Las simulaciones de cada uno de los eventos hipotéticos con capacidad para generar tsunamis se llevaron a cabo en el software EASYWAVE (Babeyco A., 2012). para conocer la altura de ola para después correlacionar esos parámetros con una tasa de excedencia de altura de ola h de los eventos con potencial de generación de tsunamis.

Tabla 4.1 Parámetros de algunas fuentes hipotéticas usadas durante las simulaciones numéricas realizadas para este estudio.

No	Long	Lat	Mw	L	W	A de rup	Dmax	Davg	MoD	MoN	Slip
1	-104.59	19.83	7.8	120.73	40.37	4980.44	2.72	0.77	7.34895E+2 7	7.34895E+2 0	4.31
2	-104.64	19.45	6.5	17.65	11.55	250.15	1.12	0.60	7.54866E+2 5	7.54866E+18	1.06
3	-104.94	20.17	6.3	13.51	9.71	165.13	0.99	0.58	3.99738E+25	3.99738E+18	0.87
4	-104.99	19.14	7.6	85.68	32.30	2921.36	2.32	0.74	3.24795E+27	3.24795E+2 0	3.35
5	-105.1	19.84	6.4	13.97	9.92	173.86	1.01	0.59	4.32515E+25	4.32515E+18	0.89



6	-105.15	20	7.9	121.77	40.60	5047.41	2.73	0.77	7.50075E+2 7	7.50075E+2 0	4.33
7	-105.23	20.29	6.4	14.74	10.27	188.97	1.03	0.59	4.9139E+25	4.9139E+18	0.93
8	-105.26	18.98	8.3	227.44	60.97	13338.91	3.64	0.84	3.31973E+28	3.31973E+21	6.84
9	-105.29	18.94	6.2	11.53	8.75	128.94	0.92	0.57	2.73744E+2 5	2.73744E+18	0.78
10	-105.35	19.25	6.1	9.19	7.56	90.68	0.83	0.56	1.59716E+25	1.59716E+18	0.66
•											
•											
•											
94	-105.35	18.95	6.4	14.14	10.00	177.14	1.01	0.59	4.4508E+25	4.4508E+18	0.90
95	-105.38	20.15	6.4	15.29	10.52	200.04	1.05	0.59	5.36109E+25	5.36109E+18	0.95
96	-105.38	20.45	6.8	26.43	15.02	468.83	1.35	0.64	1.97442E+26	1.97442E+19	1.42
97	-105.43	19.22	6.7	23.83	14.04	399.09	1.29	0.63	1.54302E+26	1.54302E+19	1.32
98	-105.43	20.07	6.1	8.98	7.44	87.48	0.82	0.55	1.51159E+25	1.51159E+18	0.65
99	-105.43	19.59	6.9	30.01	16.32	571.39	1.43	0.65	2.67264E+2 6	2.67264E+19	1.56
100	-105.46	19.51	6.3	12.81	9.38	152.03	0.97	0.58	3.52228E+25	3.52228E+18	0.84

En casos simples y que solo involucran tsunamis de origen cercanos para el PTHA se ignoran casi todas las incertidumbres, el PTHA incluye un conjunto finito de eventos tsunamigénicos hipotéticos, donde cada evento individual se repite aleatoriamente en el tiempo e independientemente de todos los demás eventos (es decir, como un proceso de Poisson), con una tasa anual media conocida λ (e) (eventos/año).

En este estudio se adopta la forma de la ecuación modificada por Jaimes et al., 2015, de la expresión propuesta por Cornell (1968) y Esteva (1967), que es una de las muchas formas que puede adoptar el teorema de la probabilidad total, para determinar la tasa de excedencia anual de h .

$$v(h) = \sum_{k=1}^{N_{\text{events}}} \Pr(h > h^* | \text{Event}_k) F_A(\text{Event}_k)$$

donde $v(h)$ es la tasa de excedencia del parámetro de intensidad h , $\Pr(h > h^* | \text{Event}_k)$ es la probabilidad de que la profundidad de inundación calculada exceda una profundidad de inundación especificada h^* , dado que el k -ésimo evento de tsunami ha ocurrido y $F_A(\text{Event}_k)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del k -ésimo evento; N_{events} son todos los eventos que potencialmente generan tsunami en el sitio de interés. El inverso de $v(h)$ es el período de retorno.

Con estos datos podemos calcular para cada fuente que sigue un proceso de Poisson para todos los terremotos que generan tsunamis, por lo tanto, las tasas de excedencia de intensidad también son un proceso de Poisson (Annaka et al., 2007);. En este sentido, la probabilidad de excedencia de la intensidad h para todas las fuentes sísmicas durante los próximos T años (ver Figura 4.1) y estaría dada por la expresión:

$$\Pr(h > h^* | T) = 1 - \exp\{-v(h)T\}$$



La evaluación probabilística de los peligros de tsunami utilizando una distribución de tamaño de frecuencia derivada empíricamente depende de qué tan bien restringida esté la distribución por los datos del catálogo. La curva de amenaza calculada por la tasa de excedencia $v(h)$ del parámetro de intensidad h para un sitio seleccionado, en función de la intensidad h de los eventos asociados con la amenaza de tsunami, donde el $1/v(h)$, es el periodo de retorno se muestra en la figura 4.1.

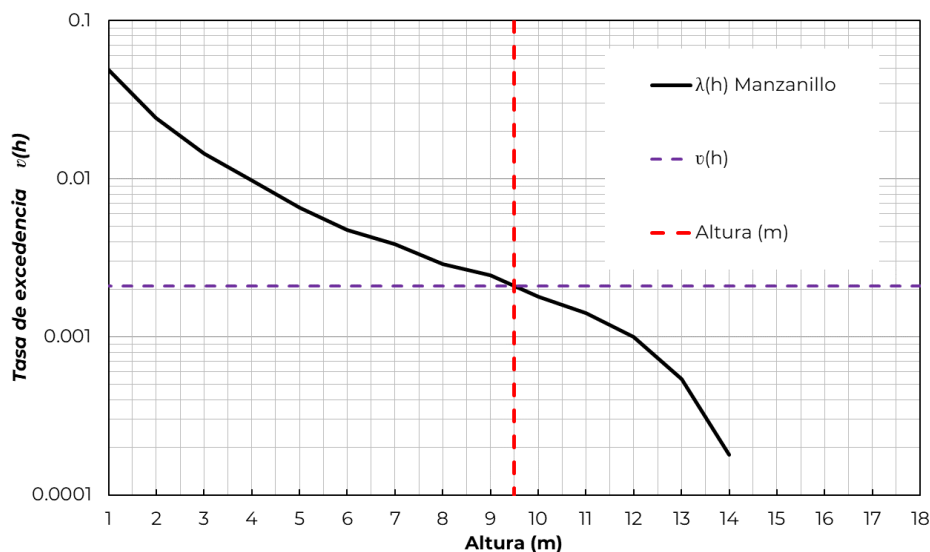


Figura 4.1 Curvas de amenaza calculada por la tasa de excedencia $v(h)$ del parámetro de intensidad h para Manzanillo, Colima. En el gráfico se muestran estimaciones para periodos de retorno de 0 a 2500 años (el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia), por ejemplo, una altura de tsunami de 9.5 metros se excederá en promedio cada 500 años ($1/0.002$).

5. Conclusiones

Se presentan los resultados del análisis probabilístico de peligro por tsunami en las costas del puerto de Manzanillo, Colima. Para ello, se realizó un análisis exhaustivo de la sismicidad regional, utilizando todas las fuentes de información sobre sismos y tsunamis disponibles en la región. Esto mediante la evaluación probabilística del peligro de tsunami también conocida como PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Analysis), para cuantificar la amenaza de una región para distintos periodos de retorno de interés “Tr”.

Para ello se realizó, la recopilación de información libre topográfica y batimétrica del Pacífico mexicano, la generación de un catálogo sintético que contempla las características de cada una de las fuentes sísmicas analizadas, el análisis Gutenberg-Richter (G-R) y de temblor característico, para cada fuente seleccionada con posibilidad de generación de tsunami, para finalmente realizar el análisis estocástico de recurrencia por tsunami para el puerto de Manzanillo.



**SEGURIDAD**SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA**CNPC**COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL**CENAPRED**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

La curva obtenida muestra que para el puerto de Manzanillo, Colima, alturas de tsunami de 14 metros se excederán en promedio cada 2500 años.

El Análisis Probabilístico de Peligro por Tsunami (PTHA) tiene como objetivo evaluar la probabilidad de que el peligro de tsunami sea superado en un determinado periodo de retorno, estas medidas pueden ser la altura de tsunami en la línea de costa o las zonas de inundación, para un siguiente estudio se realizará un análisis de inundación y se refinarán los modelos estocásticos.

Referencias

Allen, T. I., and G. P. Hayes (2015). Subduction interface fault scaling relationships to facilitate rapid ground-shaking and impact assessments, *Seismol. Res. Lett.* 86, no. 2B, 618.

Annaka, T., Satake, K., Sakakiyama, T., Yanagisawa, K., & Shuto, N. (2007). Logic-tree Approach for Probabilistic Tsunami Hazard Analysis and its Applications to the Japanese Coasts. *Pure and Applied Geophysics*, 164(2–3), 577–592. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0174-3>

Babeyco A., 2012. "EasyWave: fast tsunami simulation tool for early warning," GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam

CAT-SEMAR. 2017. HISTORIA DE LOS TSUNAMIS LOCALES OCURRIDOS EN MÉXICO

Cenapred. 2005. Series Fascículos, Tsunamis.

Cenapred. (2006). Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de peligros y riesgos, Fenómenos Geológicos.

Cornell A. 1968, "Engineering Seismic Risk Analysis", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 58, No 5, pp. 1583-1606.

Esteva, L. (1968). Criterios para la construcción de espectros de diseño sísmico. Serie Azul Del Instituto de Ingeniería, UNAM, 198.

Farreras S and Sánchez A 1991 The tsunami threat on the Mexican West coast: a historical analysis and recommendations for hazard mitigation. *Natural Hazards*

Grezio, A., Babeyko, A., Baptista, M. A., Behrens, J., Costa, A., Davies, G., Geist, E. L., Glimsdal, S., González, F. I., Griffin, J., Harbitz, C. B., LeVeque, R. J., Lorito, S., Løvholt, F., Omira, R., Mueller, C., Paris, R., Parsons, T., Polet, J., ... Thio, H. K. (2017). Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple Sources and Global Applications. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1158–1198.

Hayes, G.P. 2018. Slab2 - A Comprehensive Subduction Zone Geometry Model", USGS U.S. Geological Survey.



**SEGURIDAD**SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA**CNPC**COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL**CENAPRED**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

Thomas C. Hanks, & Hiroo Kanamori. (1979). A Moment Magnitude Scale. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 84.

Jaimes M., Reinoso, E., Ordaz M., 2015 An earthquake-event-based method for mapping tsunami hazards. Maritime Engineering

Jara, J.M. y Rosenblueth, E. (1988). Probability distribution of times between characteristic subduction earthquakes, Earthquake Spectra, 4, 499-529.

Kostoglodov, V., y Pacheco F., 1999. CIEN AÑOS DE SISMICIDAD EN MEXICO 1999, UNAM

Kowalik, Z and P. M. Whitmore (1991). An investigation of two tsunamis recorded at Adak, Alaska, Science of Tsunami Hazards, 9, 67-83.

Leonardo Suárez, Miguel (2013), sustentante. PSM2012: aplicación web para la difusión y consulta de datos de peligro sísmico.

Okada. 1985. Surface Deformation to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. Bull. Seism. Soc. Am., 75, [4], 1135-1154.

Ramírez, E., CENAPRED (2020). SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TSUNAMIS EN COSTAS MEXICANAS COMO HERRAMIENTA PARA LA PREVENCIÓN, MITIGACIÓN Y PREPARACIÓN.

UNESCO, 2005, & NOAA. (2005). Tsunamis: las grandes olas.

Zúñiga, R. 1994. Main Seismogenic Sources Zones in Mexico. Technical Report Project 89-0190 IPGH, Pan-American Institute of Geography and History.

Zuñiga, R. (1997). Seismogenic Sources Zones in Mexico. Technical Report Project 89-0190 IPGH.

Zúñiga, F. R., G. Suárez, A. Figueroa-Soto, A. Mendoza, 2017. A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. J. Seismol. 21(6):1295-1322.

Referencias web

Earthquake Source Model Database <http://equake-rc.info/srcmod/>

Global CMT Web Page <https://www.globalcmt.org/>

Servicio Sismológico Nacional <http://www.ssn.unam.mx/>

Documentos de interés

Carrier, G.F., Wu, T.T. and Yeh, H. 2003. Tsunami run-up and draw-down on a plane beach. Journal of Fluid Mechanics, 475: 79-99.

Av. Delfín Madrigal No. 665, Col. Pedregal de Santo Domingo, Alcaldía Coyoacán, Ciudad de México. Tel: 5511036000 ext. 72019, www.gob.mx/cenapred

Los avisos de privacidad están disponibles para consulta en <https://www.gob.mx/cenapred/es/documentos/avisos-de-privacidad-del-cenapred>
Página 20 de 21



**SEGURIDAD**SECRETARÍA DE SEGURIDAD
Y PROTECCIÓN CIUDADANA**CNPC**COORDINACIÓN NACIONAL
DE PROTECCIÓN CIVIL**CENAPRED**CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN
DE DESASTRES

Goto C., & Ogawa Y. 1982. Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme. Manuscript, Dept. of Civil Eng., Fac. of Eng., Tohoku Univ., translated by N. Shuto.

Imamura, F. 1996. Review of tsunami simulation with a finite difference method. Long Wave Runup Models, World Scientific Publishing Co, 25–42.

Imamura F., Shuto, N. and Goto C. 1988. Numerical simulations of the transoceanic propagation of tsunami. Proc. 6th Congress Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Japan, 265-272.

Kanamori, H. 1993. W phase. Geophysical Research letters, vol. 20, No 16, 1691-1694.

Ortiz, M. 2011. Apuntes del Curso de Capacitación Para Operar el Centro de Alerta de Tsunamis de México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B. C., México.

Papazachos B. C., Scordilis E. M., Panagiotopoulos D. G., Papazachos C. B. and Karakaisis G. F. 2004. "Global Relations between seismic fault parameters and moment magnitude of Earthquakes". Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXVI, 2004.

Sánchez Devora. A., y Farreras, S. 1993. Catálogo de Tsunamis (Maremotos) en la Costa Occidental de México. USA, World Data Center A. National Oceanic and Atmospheric Administration. United States Geological Survey. World Data Center A for Solid Earth Geophysics Publication SE-50. 94pp.

Wang, X. & Liu, P.L.D. 2007. NUMERICAL SIMULATIONS OF THE 2004 INDIAN OCEAN TSUNAMIS — COASTAL EFFECTS. Journal of Earthquake and Tsunami, September 2007, Vol. 01, No. 03: pp. 273-297.

Zelt, J.A. 1991. The run-up of nonbreaking and breaking solitary waves. Coastal Engineering, 15(3): 205-246

