

MAPA PROBABILÍSTICO DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI EN EL SECTOR BELLAVISTA, TOMÉ.

V. Valdivia Cáceres ¹, R. Aránguiz Muñoz ², R. Benavente Bravo ³.

RESUMEN:

En el presente estudio se realizó una evaluación probabilística de peligro de tsunami (PTHA), en el sector de Bellavista, comuna de Tomé, considerando terremotos generados en la zona de subducción entre la bahía de Coquimbo y la península de Arauco. Se simularon 50 escenarios estocásticos de terremoto de magnitud $M_w=9.0$, con distribución de deslizamiento heterogénea. Para el análisis probabilístico se utilizaron dos modelos de recurrencia sísmica; leyes de Gutenberg – Richter y recurrencia histórica con periodos de retorno promedio de $T=3,755$ años y $T=500$ años, respectivamente.

De los resultados obtenidos se puede concluir que un escenario aleatorio es capaz de producir profundidades de inundación que exceden los 3 m en la playa Bellavista, con una probabilidad del 50%. Como resultado de los mapas probabilísticos de inundación, para un periodo de retorno de 667 años y 8,500 años las profundidades de inundación superan los 4 m y 10 m en el borde costero, respectivamente.

PALABRAS CLAVES: *Evaluación probabilística de peligro de tsunami, Gutenberg - Richter*

ABSTRACT:

In this study, a probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) was made in the Bellavista, Tomé, considering earthquakes generated in the subduction zone between Coquimbo Bay and the Arauco peninsula. Fifty stochastic earthquake scenarios of magnitude $M_w = 9.0$ were simulated, with heterogeneous slip distribution. For the probabilistic analysis, two models of seismic recurrence were used; Gutenberg - Richter laws and historical recurrence with average return periods of $T = 3,755$ years and $T = 500$ years, respectively.

From the results obtained, it can be concluded that a random scenario is capable of producing flooding depths exceeding 3 m at Bellavista beach, with a 50% probability. As a result of the probabilistic flood maps, for a return period of 667 years and 8500 years the flood depths exceed 4 m and 10 m at the coastal edge, respectively.

KEYWORDS: *Probabilistic Tsunami Hazard Assesment, Gutenberg - Richter.*

¹ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, las ciudades costeras chilenas han experimentado diversas catástrofes naturales, siendo una de las más destructivas los tsunamis. Este tipo de eventos es generado por terremotos producidos frente a las costas de Chile producto del hundimiento de la densa placa de Nazca, bajo la menos densa Sudamericana (Cereceda et al., 2011). La región del Biobío se vió completamente afectada por el terremoto del Maule 2010 Mw 8.8, donde el run-up máximo en Dichato, Talcahuano e Isla Mocha alcanzó los 11 m, 7 m y 18 m, respectivamente (Fritz et al., 2011), dejando pérdidas materiales y humanas irremplazables.

Existen dos enfoques para realizar una evaluación de peligro de tsunami, el primero es un enfoque determinístico, el cual utiliza el escenario más desfavorable, lo que conlleva a menos gasto computacional con el fin de crear un plan de evacuación. El segundo, es una evaluación probabilística de peligro de tsunami (PTHA, Probabilistic Tsunami Hazard Assesment), que proviene de un concepto llamado análisis probabilístico de peligro sísmico (PSHA, Probabilistic Seismic Hazard Analysis) popularizado en los 70s por el trabajo pionero de Cornell et al (1968), con el fin de identificar las posibles fuentes de tsunami y los escenarios que tienen mayor impacto en el sitio de interés (Mori et al, 2018). PTHA estima la probabilidad de inundación del tsunami en un determinado periodo de tiempo.

Tradicionalmente en Chile, las cartas de inundación por tsunami se han desarrollado utilizando eventos históricos, considerando una distribución del desplazamiento homogénea. En este estudio se desarrollará un PTHA, considerando escenarios estocásticos de terremoto de magnitud Mw 9.0, asumiendo como incertidumbres los parámetros de ruptura de éste, como la geometría del área de ruptura, ubicación de la fuente, y distribución heterogénea del deslizamiento.

Se han realizado varios estudios con el enfoque probabilístico en el mundo, González et al. (2009) desarrolló una evaluación probabilística de peligro de tsunami para fuentes sísmicas de campo de cercano y lejano en Seaside, Oregón, donde consideró como una incertidumbre extra el efecto de la marea con el fin de crear mapas de inundación para 100 y 500 años de periodo de retorno. Grezio et al. (2012) aplicó un procedimiento bayesiano para desarrollar un PTHA, considerando fuentes sísmicas submarinas, como fallas masivas submarinas, en el estrecho de Messina (Sicilia, Italia). Horspool et al. (2014), realizó un PTHA para Indonesia, generando mapas de peligro para periodos de retorno de 100, 500 y 2500 años. Mueller et al. (2015), investigó los efectos de la complejidad de ruptura para comprender mejor las implicaciones de realizar un PTHA entre otros.

El objetivo general de realizar este estudio, es construir mapas probabilísticos de inundación en el sector Bellavista, Tomé, a partir de dos métodos de recurrencia sísmica; Ley de Gutenberg – Richter y recurrencia histórica, considerando registros paleosísmicos.

Se presentará en primer lugar la metodología utilizada en este estudio; zona de estudio, datos topobatemétricos, evaluación probabilística de peligro de tsunami, generación de escenarios estocásticos, curvas de recurrencia sísmica, modelo numérico y parámetros de simulación. En segundo lugar,

resultados obtenidos de las curvas de recurrencia sísmica, simulación de escenarios y mapas de inundación probabilísticos. Finalmente, discusión y conclusiones del estudio.

2. METODOLOGÍA

2.1. Zona de estudio

El sector Bellavista está localizado al sur de la comuna de Tomé, VIII Región del Biobío, a las orillas del Estero Bellavista. Uno de sus atractivos turísticos más visitado es la playa Bellavista en época de verano, la cual recibe miles de turistas al año.

A inicios del siglo XX, Bellavista se caracterizó por ser un sector industrial, donde se encontraba la textilería más importante del país, convirtiéndose en la mayor fuente de empleo de la comuna. Al ver el gran crecimiento de la textilería, la empresa construyó una iglesia, mercados, escuela, gimnasios y casas para sus trabajadores, dando lugar al sector Bellavista. En el 2008 la fábrica cerró definitivamente sus puertas, para luego convertirse en el 2010 en un patrimonio nacional.

En el terremoto del 27 de febrero del 2010, Bellavista a diferencia de otros sectores costeros de la comuna no sufrió grandes impactos, sólo la anegación algunas casas cercanas a la ribera del estero Bellavista y la caída de murallas de adobe.



Figura 1. Ubicación geográfica Bellavista, Tomé.

2.2. Recopilación y procesamiento de datos topo-batimétricos

Para realizar la caracterización de la zona de estudio, fue necesario recopilar información topo-batimétrica, para generar la grilla de detalle utilizada en el modelo numérico, considerando los siguientes datos:

- Perfiles perpendiculares a la línea de costa, con resolución de 15 m aproximadamente, se realizó una campaña de terreno el 10 de septiembre del 2018, desde las 16:00 – 18:30 hrs, utilizando un GPS para efectuar las mediciones, el nivel medio del mar fue medido a las 18:30 horas.
- Batimetría de detalle de la playa bellavista, con una resolución de 20 m aproximadamente, medidos el 23 de noviembre del 2018, desde las 10:50 – 12:15 horas.
- Topografía lidar del sector Bellavista medida en noviembre del 2018 realizada con un dron, comprendió un área 0.939 km², resolución aproximada de 2 m.
- Topografía lidar de Tomé, de 2 m de resolución del año 2009, con datos desde la cota 2.25 msnm a 300 msnm.
- Carta náutica de Tomé obtenida del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), posee una resolución 185 m.

Se refirió toda la información al nivel medio del mar, corrigiendo los perfiles perpendiculares y la batimetría de detalle, utilizando el nivel de marea registrada en www.ioc-sealevelmonitoring.com, según los datos del mareógrafo estación Quiriquina. Para realizar la unión de la información topo-batimétrica, se utilizó el software de procesamiento de datos SIG (Sistema de Información Geográfica) Global Mapper v19, estandarizando la información al sistema de coordenadas geográficas. Se tuvo que procesar y limpiar la topografía lidar, utilizando solo la información del nivel de terreno, para no generar desniveles al crear la grilla de detalle. El acoplamiento de los datos topo-batimétricos se realizó considerando la línea de costa.

A partir de la topo-batimetría generada se construyó la grilla de detalle (grid_e.dat), de resolución 0.5'', usando el software de mapeo de superficies y contornos 3D, Surfer 13.

2.3. Evaluación probabilística de peligro de tsunami (PTHA)

El enfoque probabilístico combina muchas regiones sismogénicas y magnitudes de terremotos para estimar una medida probabilística del peligro general de tsunami en ubicaciones evaluadas (Geist y Parsons, 2006).

En este estudio se considerará la región sismogénica que abarca desde la bahía de Coquimbo, Región de Coquimbo, hasta la península de Arauco, Región del Biobío. La secuencia histórica de grandes terremotos ($M_w > 8$) que claramente rompieron la interfaz de placa de Chile Metropolitano comenzó en 1730 y continuó en 1822, 1906 y 1985 (Carvajal et al 2017). Además de estos eventos, otros grandes terremotos se han roto históricamente en la zona de ruptura probable del terremoto de 1730 (Carvajal et al 2017). Los registros escritos sugieren que la parte sur de la región se ha roto por grandes terremotos

interplaca ($M_w > 8$) centrados en gran parte hacia el sur en 1570, 1657, 1751, 1835 y 2010 (M_w 8.8) [Lomnitz, 2004; Udías et al., 2012].

Para realizar la evaluación probabilística de peligro de tsunami adoptamos la metodología desarrollada por Sepúlveda (2019), la cual supone que los eventos de inundación puedan describirse temporalmente mediante una distribución de Poisson, combina la recurrencia del terremoto de magnitud M_{wj} ubicado en x_i , con la probabilidad de exceder un cierto valor métrico de tsunami h_c , $P_h(h > h_c | M_{wj}, x_i)$. Donde el periodo de retorno medio conjunto de exceder h_c , está dado por la siguiente ecuación,

$$T_R(h_c) = \frac{1}{\sum_j \sum_i \lambda_{M_{wj}, x_i} P_h(h > h_c | M_{wj}, x_i)} \quad (1)$$

2.4. Generación de escenarios de magnitud $M_w=9.0$

Se generaron escenarios de terremoto de magnitud M_w 9.0, utilizando las leyes de escala de dimensión de ruptura de Blaser et al (2010), para determinar el largo L y el ancho W del área de ruptura.

$$\begin{aligned} \log_{10} L &= -2.37 + 0.57 M_w \\ \log_{10} W &= -1.86 + 0.46 M_w \end{aligned} \quad (2)$$

La distribución del deslizamiento y la ubicación del terremoto se obtuvieron a partir de un enfoque estocástico, utilizando la expansión de Karhunen – Loève, el cual se modela como un campo aleatorio y un vector aleatorio, respectivamente. Este modelo genera escenarios aleatorios que siguen la función espectral de Von Karman, para imponer correlaciones espaciales.

Los parámetros A_z y A_x son las longitudes de correlación a lo largo del dip y el rake para el evento. Conceptualmente, las longitudes de correlación determinan el tamaño predominante de las asperezas en el modelo de deslizamiento. Se utilizaron las longitudes de correlación propuesta por Goda et al (2016),

$$A_z = -2.1448 + 0.4313 M_w \quad (3)$$

$$A_x = -2.3743 + 0.4994 M_w \quad (4)$$

Este estudio utilizó como primera aproximación 50 escenarios seleccionados aleatoriamente del conjunto de escenarios analizados en Becerra (2019), los cuales cumplieran con la magnitud esperada M_w 9.0, largo L y ancho W del área de ruptura, determinados en la ecuación (2).

2.5. Geometría área de ruptura

En este estudio se considera un segmento de área de ruptura entre la bahía de Coquimbo y la península de Arauco, con coordenadas geográficas entre la latitud $[-29.9643^\circ, -37.6429^\circ]$ y longitud $[-74.4872^\circ, -71.0769^\circ]$. El área de ruptura se encuentra dividido en 376 subfallas de 20 x 20 km. Se adoptó la geometría de falla según el modelo Slab 1.0, (Hayes et al, 2012), con ángulo de manteo (dip) o de buzamiento variable entre 3° a 25° , ángulo de rumbo (strike) entre 349° a 28° , y se consideró el ángulo de deslizamiento (rake) constante de 90° en todo el plano de subducción.

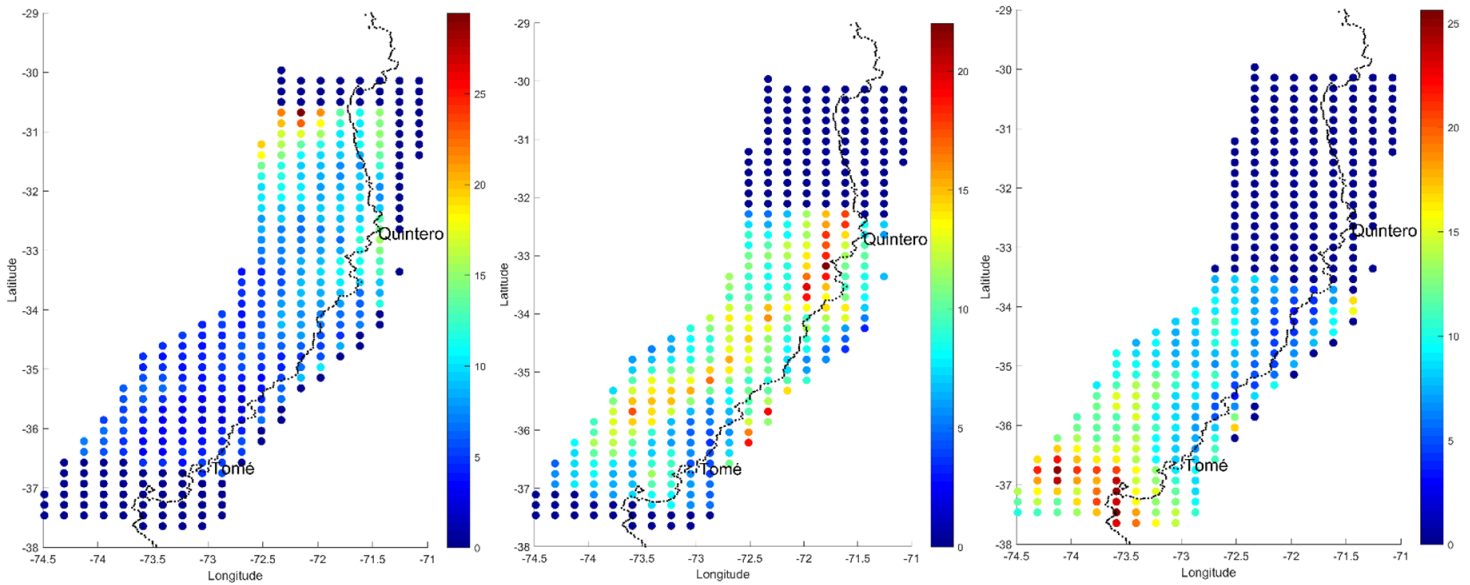


Figura 2. Ejemplo de 3 modelos de ruptura, (1) Slip máximo al norte de 28 m, (2) al centro de 23 m, (3) al sur de 26 m.

2.6. Recurrencia sísmica

2.6.1. Curvas de recurrencia sísmica o ley G-R

Las curvas de recurrencia sísmica o ley de Gutenberg – Richter, definen el número de terremotos anuales (λ_m) de magnitud M_w que exceden un valor m , está expresada por la siguiente ecuación,

$$\lambda_m = 10^{a-bm} \quad (5)$$

donde a es el número de terremotos de magnitud mayor o igual a cero, b describe la probabilidad relativa de terremotos grandes y pequeños (Kramer, 1996). Otra forma de expresar la ecuación (1), en términos de un esperado número de eventos mayores de que la magnitud mínima (M_{min}).

$$\lambda_m = \lambda e^{-\beta(m-M_{min})} \quad (6)$$

donde $\lambda = e^{\alpha-\beta M_{min}}$, $\alpha = a * \log 10$ y $\beta = b * \log 10$. Esta ley considera una magnitud máxima límite $M_{máx}$ la cual está dada por la zona sismogénica estudiada. La probabilidad de que ocurra un terremoto de magnitud m está dado por la función probabilidad densidad (PDF),

$$f_M(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m-m_0)]}{1-\exp[-\beta(m_{max}-m_0)]} \quad (7)$$

2.6.2. Recurrencia sísmica histórica

En este estudio, se consideró utilizar un método de recurrencia histórica, el cual se basa en recopilar información acerca de los terremotos ocurridos en épocas donde no existían instrumentos de medición sísmica, para agregarlo a la base de datos existente.

Los relatos históricos del centro de Chile describen terremotos destructivos en 1575, 1580, 1647, 1730, 1822, 1906 y 1985 d. C. (Lomnitz, 1970, 2004; Cisternas et al., 2012). Basado en el tsunami generado, el terremoto de 1730 fue al menos tan grande como el Mw 8.8 2010 Maule, terremoto que devastó el centro-sur de Chile (Dura et al, 2014). El terremoto de 1730 afectó a más de 800 km de la costa chilena, causando daños tan al norte como Copiapó y tan al sur como Concepción, que están a 1000 km de distancia (Dura et al, 2014).

El intervalo de recurrencia de terremotos y tsunamis prehistóricos en Quintero es comparable a los intervalos de recurrencia en otras zonas de subducción que se cree que preservan la evidencia de terremotos y tsunamis inusualmente grandes ($> M_w 8.5$). Entre 6200 y 3600 años BP (before 1950), el intervalo entre grandes terremotos en la zona de subducción en Quintero varió de ~ 200 a ~ 650 años con un intervalo de recurrencia promedio de ~ 500 años (Dura et al 2014).

Se utilizó este intervalo de recurrencia promedio ya que el plano de falla definido para este estudio contiene la zona estudiada por Dura et al (2014).

2.7. Modelo numérico de tsunamis

En este estudio se utilizó el modelo numérico de tsunamis, Neowave (Non-hydrostatic Evolucion of Ocean WAVES), que resuelve, por medio de técnicas de diferencias finitas escalonadas, las ecuaciones de onda no lineales en aguas someras que representa presiones no hidrostáticas por medio de la velocidad vertical para describir ondas débilmente dispersivas y el esquema de conservación de momentum logrando representar las discontinuidades del flujo, como resaltos hidráulicos (Yamazaki et al. 2009, 2011a). Se implementa un límite de movimiento mojado-seco para el modelado detallado de inundación / runup a lo largo de la costa y la transmisión de onda completa en mar abierto (Ruiz et al 2015). NEOWAVE es una herramienta muy potente para el estudio de tsunamis, abarcando los procesos de generación, propagación e inundación en zonas costeras (Yamazaki et al. 2011a; Lay et al. 2013).

Para realizar la propagación del tsunami en la zona de estudio, fue necesario desarrollar 5 grillas anidadas; Grilla A del Océano Pacífico y centro de Chile, Grilla B de la Región del Maule y Región Biobío, Grilla C de la Región del Biobío, Grilla D de la bahía de Concepción y Grilla E de Tomé – Bellavista, con resolución y paso del tiempo como se muestra en la tabla 1. Se utilizó un tiempo de simulación de 6 horas desde la ruptura del terremoto y coeficiente de fricción de Manning constante de 0.025 para describir el fondo marino.

Grilla	Resolución (")	Resolución (m)	Paso del tiempo computacional (Δt)
Grilla A	120"	~ 3700 m	2 s
Grilla B	30"	925 m	1 s
Grilla C	6"	185 m	0.25 s
Grilla D	1"	30.8 m	0.125 s, 0.0625 s y 0.03125 s
Grilla E	0.5"	15.4 m	0.125 s, 0.0625 s y 0.03125 s

Tabla 1. Resolución de grillas y paso del tiempo computacional utilizados en la simulación de los escenarios.

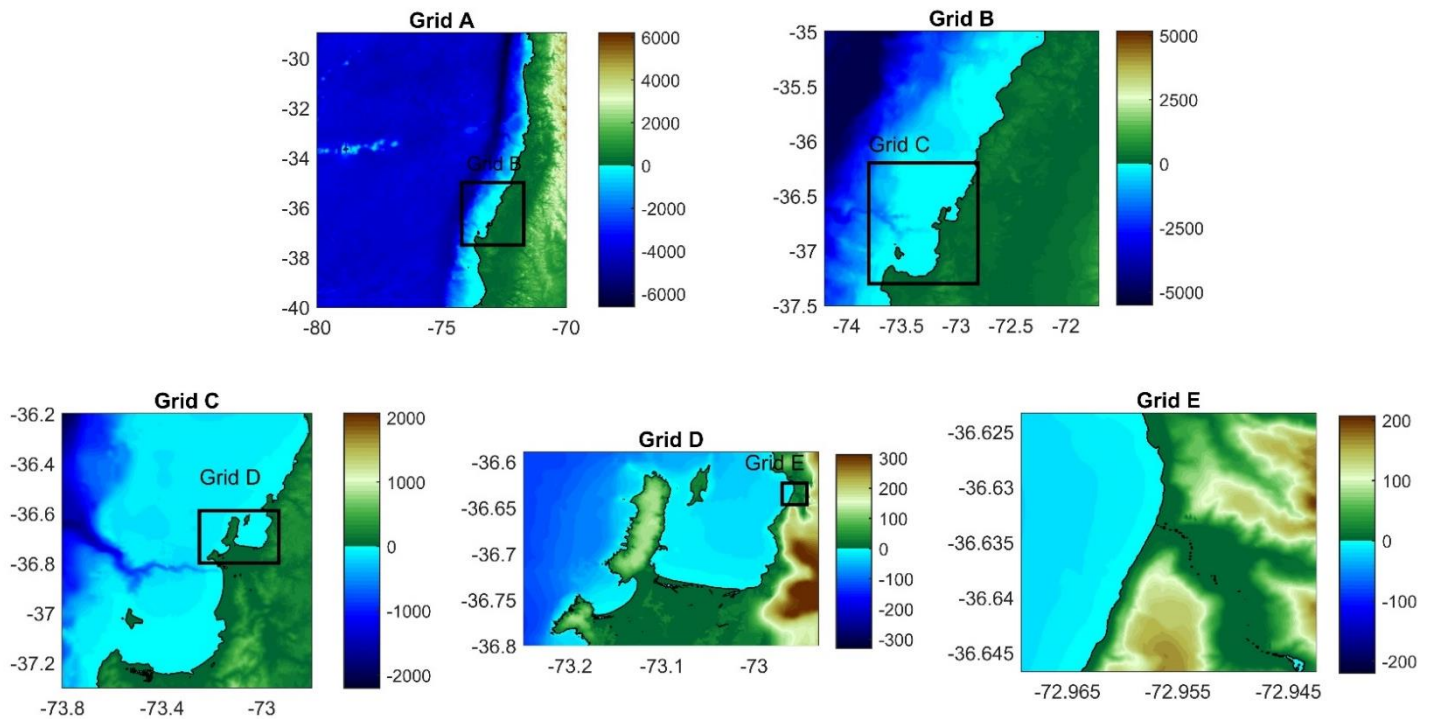


Figura 3. Grillas utilizadas en la simulación numérica, software NEOWAVE, con resolución de 3700 m, 925 m, 185 m, 30,8 m y 15,4 m respectivamente.

3. RESULTADOS

3.1. Curvas de recurrencia sísmica

A partir de la metodología descrita en el punto 2.3, se realizarán las curvas de recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter, la cual se trabajará con la zona comprendida entre la bahía de Coquimbo y la península de Arauco, la que coincide aproximadamente con las zonas sismogénicas interplaca 5, 6 y 7 descritas por Núñez (2014). En la tabla 2, se muestran los parámetros a y b de dichas zonas sismogénicas del método de máxima verosimilitud.

Zona sismogénica	a	b	M _{máx}
Zona 5	5.48	0.97	8.6
Zona 6	5.97	1.006	9.1
Zona 7	5.226	0.937	9.2

Tabla 2. Parámetros a y b de zonas sismogénicas Núñez (2014).

Se creó un código en el software MATLAB, para construir un catálogo sintético de terremotos de cada zona sismogénica, a partir de los parámetros a y b anteriormente descritos, utilizando un periodo de observación de los datos de 50,000 años. Luego se realizó una superposición de los catálogos con el fin de unir las tres zonas sismogénicas y determinar los parámetros a y b equivalentes. El catálogo sintético contiene un total 822,406 terremotos, con magnitud mínima M_{\min} 5.0 y magnitud máxima M_{\max} 9.2.

Para determinar el valor β del catálogo sintético, realizamos una regresión bayesiana, es un proceso de ajustar un modelo de probabilidad a un conjunto de datos y resumir el resultado mediante una distribución de probabilidad de los parámetros del modelo. Combina una distribución a priori o inicial de los parámetros de interés (en este caso β), con la información muestral para luego definir la distribución posteriori. Dado que la distribución del catálogo sigue una distribución exponencial (ecuación 7), se utiliza la distribución probabilidad gamma como prior para β , lo que resulta en una distribución gamma a posteriori. El parámetro beta se obtuvo de la media de distribución, el cual es $\beta = 2.2618$, con desviación estándar de 0.0025, lo que implica que tiene una buena dispersión de los datos.

En la figura 4, se muestra la curva de recurrencia sísmica dada por la ecuación (7), donde el periodo de retorno promedio de que ocurra un terremoto de magnitud M_w 9.0 es de 3,755 años.

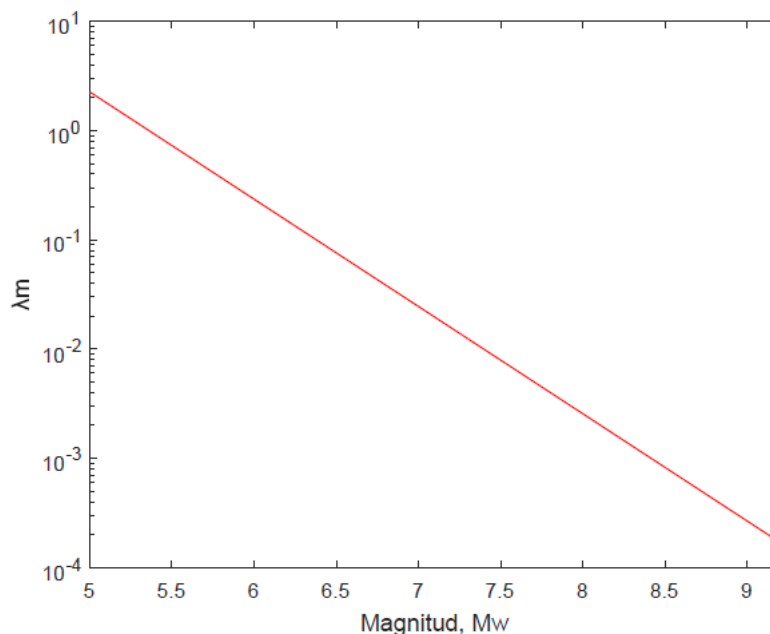


Figura 4. Curva de recurrencia sísmica de un catálogo sintético de 50,000 años para la región sismogénica.

3.2. Simulación

La figura 5, muestra la variación del nivel del mar registrado en el mareógrafo virtual ubicado frente a la playa Bellavista (B1) para los 50 escenarios de terremotos simulados. Es posible observar que la primera ola arriba entre los 15 minutos a 70 minutos, llegando a una amplitud máxima que supera los 12 metros en algunos escenarios, la segunda ola llega alrededor de los 120 minutos con una amplitud máxima superior a 7 metros y la tercera ola llega antes de los 180 minutos con una amplitud máxima de 4 metros aproximadamente.

La figura 6 muestra las alturas de inundación dadas por tres escenarios anteriormente presentados en la figura 2, con su respectiva deformación inicial. Se puede ver que entre más cercana se produzca la ruptura del terremoto a la zona de estudio mayor será la intensidad con la llega el tsunami, alcanzando los 12 m de amplitud en el tercer escenario. Existe gran variabilidad en la respuesta del tsunami para los 50 escenarios simulados. Además, se presentan seis ubicaciones a lo largo de la playa y estero Bellavista que servirán de referencia posteriormente en el capítulo 3.3 para obtener resultados.

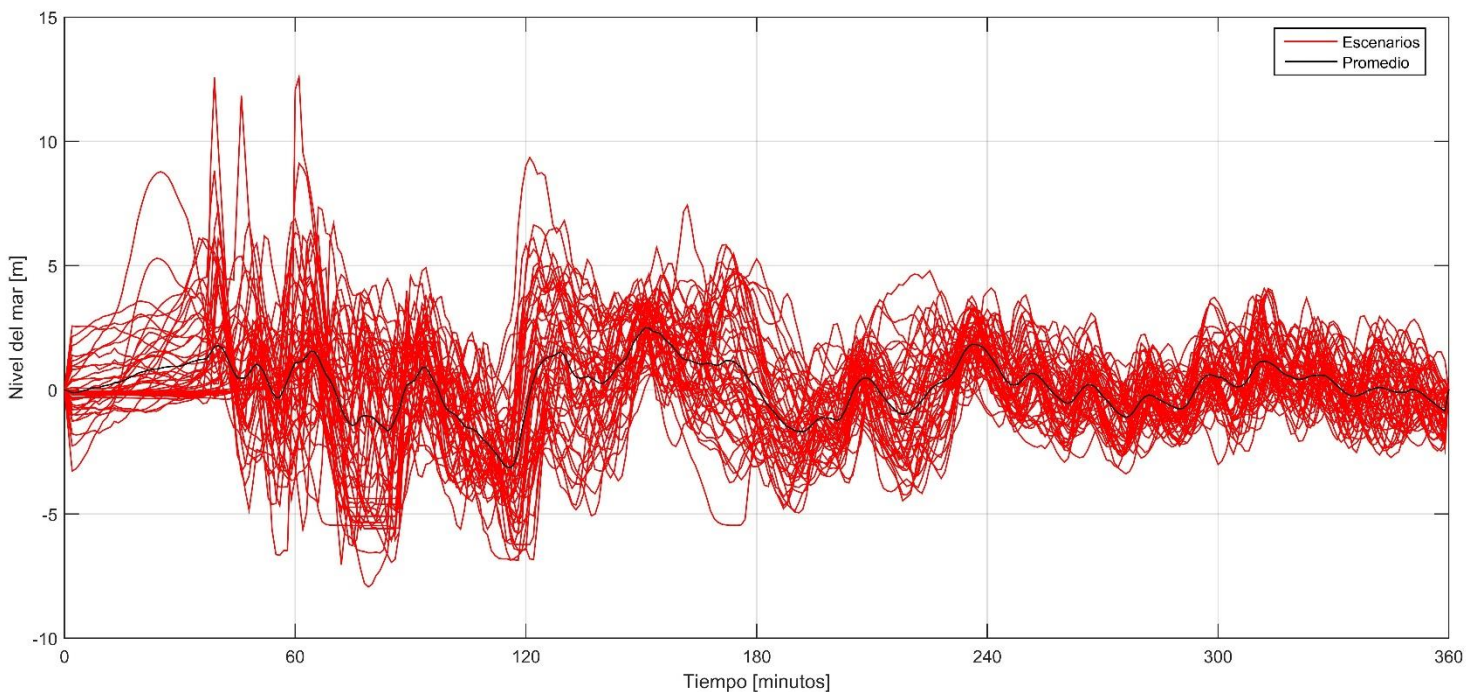


Figura 5. Mareograma (B1) de 50 escenarios simulados, líneas color rojo representa la variación del nivel del mar de los 50 escenarios, línea color negro promedio del nivel del mar.

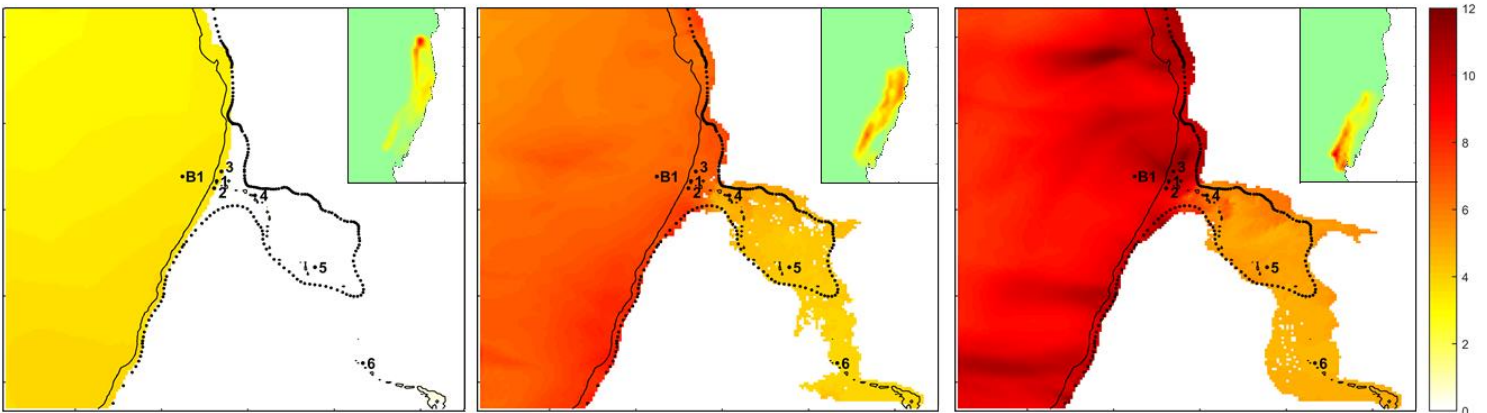


Figura 6. Amplitudes máximas de tsunami con respectiva deformación inicial, ubicada en el extremo superior derecho, línea negra punteada corresponde al límite de la inundación definida en la carta de inundación del SHOA, B1 mareógrafo virtual, Puntos 1 – 6 ubicaciones a evaluar en PTHA.

3.3. Mapa de inundación probabilístico

Luego de realizar la propagación de los 50 escenarios de tsunami, se generó una base de datos con las amplitudes máximas de tsunami en la grilla de detalle, corrigiendo por deformaciones co-sísmicas y datos topo-batimétricos, con el fin de obtener profundidades de inundación de tsunami.

En esta sección presentaremos tres tipos de resultados, curvas de excedencia que muestran la probabilidad de exceder una profundidad de inundación, curvas de peligro que son las profundidades de inundación en términos de periodo de retorno y mapas de inundación asociados a un periodo de retorno medio conjunto de la inundación en el sector Bellavista.

3.3.1. Curvas de excedencia

Para la construcción de las curvas de excedencia, fue necesario realizar pruebas de bondad de ajuste a la base de datos, utilizando como funciones de probabilidad teórica las distribuciones Normal, Gumbel y Genérica, las cuales no lograron un buen ajuste gráfico en celdas con menos de 30 datos. Se utilizó la función distribución empírica acumulada para obtener la probabilidad de exceder cierto valor h_c , $P_h(h > h_c | M_{wj}, x_i)$.

En la siguiente figura, se presentan curvas de excedencia para los seis puntos definidos anteriormente, donde se puede ver que con un 50% de probabilidad de excedencia las profundidades de inundación superan los 3 m en la orilla de la playa en las ubicaciones 1, 2 y 3 y los 0.5 m a lo largo del estero Bellavista en las ubicaciones 4, 5 y 6.

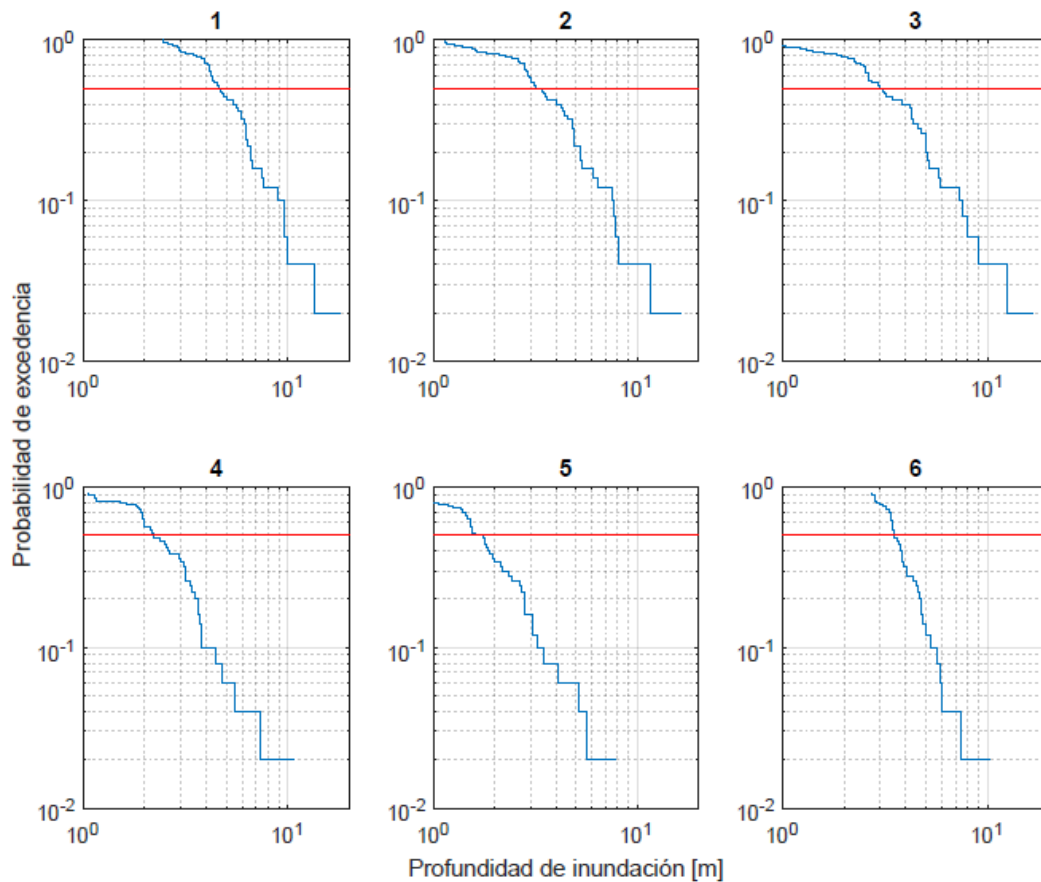


Figura 7. Curvas de excedencia de profundidad de inundación para seis ubicaciones evaluadas, 50 % de probabilidad de excedencia está representada por línea horizontal color rojo.

3.3.2. Curvas de peligro

Las curvas de peligro son la combinación entre la recurrencia sísmica del terremoto y la probabilidad de exceder cierto valor h_c . Del modelo de recurrencia sísmico definido en el punto 3.1. obtenemos que el periodo de retorno promedio para un terremoto de magnitud M_w 9.0 es de 3,755 años. Por lo tanto, el periodo de retorno medio conjunto de exceder h_c dado por la ecuación (1) para una probabilidad de excedencia del 50% es $3,755/0.5 = 7,510$ años, con profundidad de inundación de 4 m en el punto 1.

En la figura 8, se muestra las curvas de peligro para los seis puntos evaluados, las cuales presentan la profundidad de inundación del tsunami con los respectivos periodos de retorno. Se puede ver que las profundidades de inundación son significativas solo para largos periodos de retorno. Las profundidades de inundación en el punto 1, utilizando el método de Gutenberg – Richter el cual corresponde a las líneas de color rojo, para un periodo de retorno medio conjunto de 4,000 años supera los 2.5 m y para un periodo de retorno de 100,000 años logra alcanzar 15 m.

Utilizando el método de recurrencia sísmica histórica, el periodo de retorno promedio es de 500 años, por lo cual el periodo de retorno medio conjunto de exceder un valor h_c , para una probabilidad de excedencia del 50% es de $500/0.5 = 1,000$ años, con una profundidad de inundación de 4 m en el punto 1. En la figura 8 las líneas de color azul corresponden a las curvas de peligro determinadas a partir del método de recurrencia histórica, donde las profundidades de inundación en el punto 1 para un periodo de retorno medio conjunto de 500 años supera los 2.5 m y para un periodo de retorno de 25,000 años alcanza los 15 m.

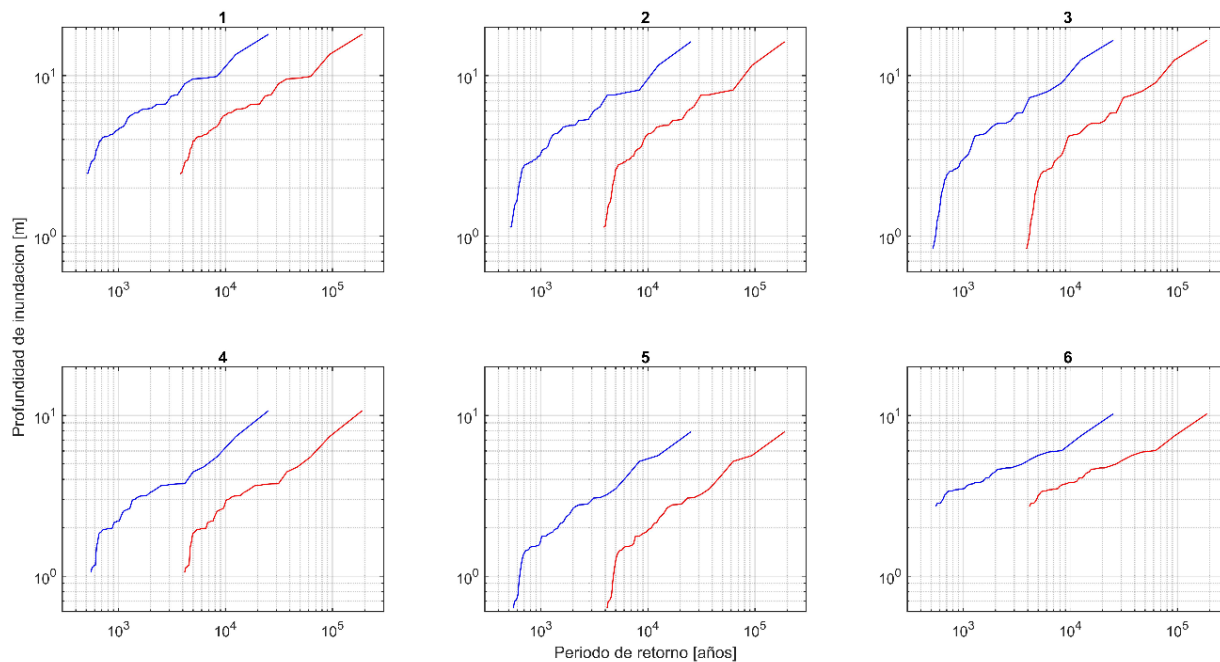


Figura 8. Curvas de Peligro para seis puntos evaluados, representando en color rojo recurrencia sísmica Gutenberg Richter $T_r=3,755$ años y color azul recurrencia sísmica histórica $T_r=500$ años.

3.3.3. Mapa de inundación

Los mapas de inundación se crean a partir de las curvas de peligro desarrolladas para cada celda de la grilla de detalle, interpolando las profundidades de inundación dado un periodo de retorno promedio seleccionado, con probabilidades de exceder una profundidad de inundación h_c . Para la creación de los mapas de inundación se seleccionaron probabilidades de excedencia de 75%, 44,2% y 5.9%, con el fin de generar un mapa con una inundación intermedia y dos mapas de inundación con un periodo de retorno de 8500 años.

Como se muestra en la figura 9, el lado norte del sector Bellavista comprende una inundación máxima de 1 m, el estero Bellavista 2 m y la inundación más significativa se ve en la playa alcanzando los 5 m de profundidad, con un área inundada de 11.6054 hectáreas, mapa con periodo de retorno $T_r = 5,007$ años según recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter y $T_r = 667$ años según recurrencia sísmica histórica.

Las figuras 10, representan las inundaciones asociadas a un periodo de retorno $T_r = 8,500$ años, utilizando los dos métodos de recurrencias sísmicas adoptadas en este estudio. Se puede ver que en la figura 10a, las profundidades de inundación llegan a los 6 m en la playa Bellavista y en el sector poblado hasta 2 m de profundidad y en la figura 10b, alcanzan una profundidad de inundación de 12 m en la playa y hasta 5 m en el sector poblado. Comprenden un área inundada de 59.50836 hectáreas y 69.19815 hectáreas respectivamente.



Figura 9. Mapa de inundación, con 75% de probabilidad de excedencia, periodo de retorno medio conjunto según recurrencia sísmica de Gutenberg - Richter 5,007 años y según recurrencia sísmica histórica de 667 años.

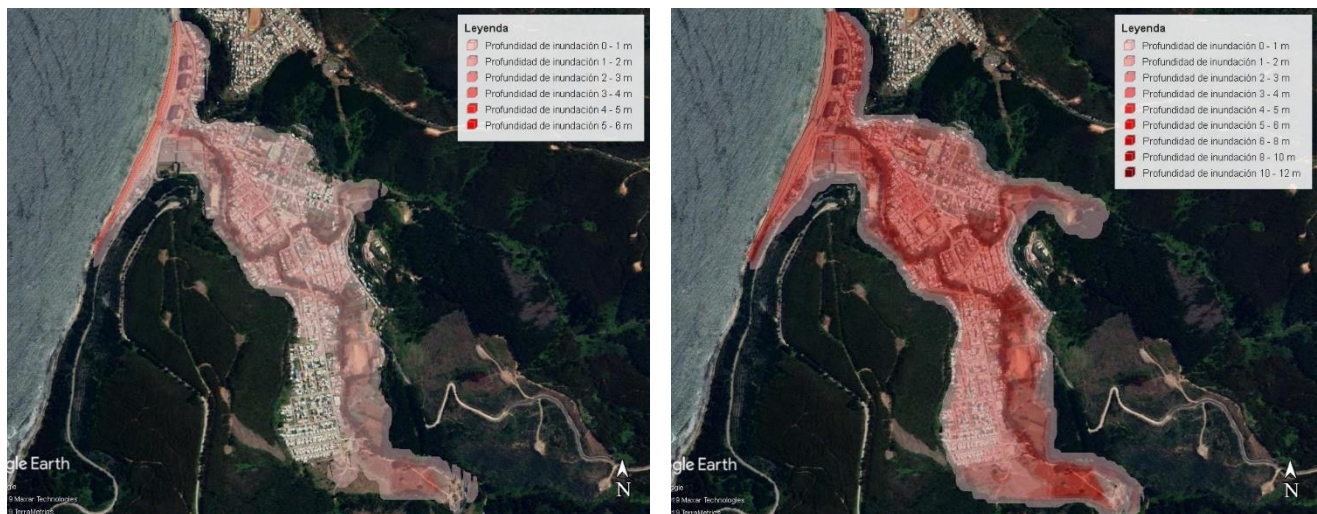


Figura 10. Mapas de inundación con periodo de retorno medio conjunto de $T_r=8,500$ años, según a) recurrencia sísmica de Gutenberg - Richter b) recurrencia sísmica de histórica.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio es la primera evaluación probabilístico de peligro de tsunami que se desarrolla en el sector Bellavista, oficialmente solo se contaba con la carta de inundación determinada por el SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada chilena), basado en el terremoto de 1835. Como se muestra en la figura 6, el comportamiento de la inundación de los escenarios simulados en este estudio está controlado por la entrada del estero Bellavista, lo que demuestra que el escenario simulado por el SHOA podría no representar una inundación real. Si bien no se conocen los parámetros utilizados en la simulación numérica por el SHOA, este estudio considera información topo-batimétrica detallada con resolución (15,4 m) del sector Bellavista, lo cual permite obtener resultados más precisos y específicos de la zona.

Los resultados presentados en la figura 6, indican que los tsunamis con menor amplitud máxima se producen en una ubicación lejana a la zona de estudio (al norte del área de ruptura), y los tsunamis con mayor amplitud máxima se generan hacia el sur del área de ruptura del terremoto. Esto se debe a que las ondas de tsunamis que no ocurren frente a la zona de estudio se atenúan a medida que se propagan.

De los mapas de inundación mostrados en las figuras 10, observamos que para un periodo de retorno de $T=8,500$ años, utilizando el modelo de recurrencia histórica la profundidad de inundación máxima en la costa es de 12 m y utilizando el modelo recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter estimamos que la profundidad máxima de inundación es de 6 m. Para realizar evaluaciones de riesgo o planes de evacuación, es más acertado considerar el modelo de recurrencia histórica, ya que si se compara con el modelo de Gutenberg – Richter desarrollado en este estudio, posee periodos de retorno más bajos, estima mayores profundidades de inundación y tiene mayor probabilidad de ocurrencia.

Una de las limitaciones de este estudio fue al realizar la curva de recurrencia sísmica de Gutenberg – Richter, el considerar la probabilidad de que ocurra un terremoto de una magnitud determinada ($M_w 9.0$), disminuye la recurrencia de este. Al contrario de lo adoptado en el estudio de Sepulveda (2019), donde considera la probabilidad de que ocurra un terremoto de magnitud definida por un rango de posibles intensidades.

Cabe destacar que la evaluación probabilística presentada en este estudio sólo consideró tsunamis generados en la zona comprendida entre la bahía de Coquimbo y la península de Arauco, por lo cual sería relevante analizar tsunamis generados en otras zonas sismogénicas para evaluar totalmente el peligro de tsunami en Bellavista.

5. REFERENCIAS

- Becerra, I. (2019), Evaluación probabilística de peligrosidad por tsunami (PTHA) en Chile central: Un caso de estudio de la bahía de Quintero. Tesis de Magister, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.
- Blaser, L., F. Krüger, M. Ohrnberger, and F. Scherbaum (2010), Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment, *Bull Seismol Soc Am* 100(6):2914–2926.
- Carvajal, M., Cisternas, M, and Catalán P. A, (2017). Source of the 1730 Chilean earthquake from historical records: Implications for the future tsunami hazard on the coast of Metropolitan Chile, *J. Geophys. Res.* 122, 3648–3660.
- Cereceda, P., Errázuriz, A.M. y Lagos, M. (2011). *Terremotos y Tsunamis en Chile*. Origo Ediciones, Santiago.
- Cisternas, M., Torrejon, F., Gorigoitia, N. (2012). Amending and complicating Chile's seismic catalog with the Santiago earthquake of 7 August 1580. *J. South Am. Earth Sci.* 33 (1), 102e109.
- Cornell CA (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bull Seismol Soc Am* 58 (5): 1583–1606.
- Dura, T., Cisternas, M., Horton, B.P., Ely, L.L., Nelson, A.R., Wesson, R.L., Pilarczyk, J.E. (2015). Coastal evidence for Holocene subduction-zone earthquakes and tsunamis in central Chile. *Quat. Sci. Rev.* 113, 93e111.
- Fritz, H., Petroff, C., Catalán, P., Cienfuegos, R., Winckler, P., Kalligeris, N., Weiss, R., Barrientos, S., Meneses, G., Valderas-Bermejo, C., Ebeling, C., Papadopoulos, A., Contreras, M., Almar, R., Domínguez, J. and Synolakis, C. (2011). Field Survey of the 27 February 2010 Chile Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*.
- Geist EL, Parsons T (2006), Probabilistic analysis of tsunami hazards. *Nat Hazards* 37:277–314
- Goda K, Yasuda T, Mori N, Maruyama T (2016) New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulation. *Coast Eng J* 58(3):1650010.
- González FI, Geist EL, Jaffe B, Kânoğlu U, Mofjeld H, Synolakis C E, Horning T (2009), Probabilistic tsunami hazard assessment at seaside, Oregon, for near-and far-field seismic sources. *J Geophys Res: Oceans*, 114 (C11).
- Grezio A, Marzocchi W, Sandri L, Gasparini P (2010), A Bayesian procedure for probabilistic tsunami hazard assessment. *Nat Hazards* 53 (1): 159–174.
- Hayes, G.P., Wald, D.J., Johnson, R.L., 2012. Slab1.0: a three-dimensional model of global subduction zone geometries. *J. Geophys. Res., Solid Earth* (1978–2012) 117 (B1).

- Horspool N, Pranantyo I, Griffin J, Latief H, Natawidjaja DH, Kongko W, Cipta A, Bustaman B, Anugrah SD, Thio HK (2014), A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 14 (11): 3105–3122.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J
- Lay T, Ye L, Kanamori H, Yamazaki Y, Cheung KF, Ammon CJ (2013) The February 6, 2013 M_w 8.0 Santa Cruz Islands earthquake and tsunami. *Tectonophysics*.
- Lomnitz, C., (1970) Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955. *Int. J. Earth Sci.* 59, 938e960.
- Lomnitz, C., (2004), Major earthquakes of Chile: a historical survey, 1535-1960. *Seismol. Res. Lett.* 75 (3), 368e378.
- Mori N, Goda K, Cox DT (2017) Recent process in probabilistic tsunami hazard analysis (PTHA) for mega thrust subduction earthquakes. In: *Reconstruction and restoration after the 2011 Japan earthquake and tsunami: insights and assessment after 5 years*.
- Mueller C, Power W, Fraser S, Wang X (2015), Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example. *J Geophys Res Solid Earth* 120 (1): 488–502.
- Núñez, I. (2014). *Nuevo peligro sísmico para Chile*, Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Ruiz, J. A., Fuentes, M., Riquelme, S., Campos, J., and Cisternas, A. (2015), Numerical simulation of tsunami runup in northern Chile based on non-uniform $k-2$ slip distributions, *Nat. Hazards*, 79, 1177–1198.
- Sepúlveda, I., Liu, P. L. F., & Grigoriu, M. (2019). Probabilistic Tsunami Hazard Assessment in South China Sea with consideration of uncertain earthquake characteristics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.
- Udías, A., Madariaga R., Buforn E., Muñoz D., and Ros M. (2012), The large Chilean historical earthquakes of 1647, 1657, 1730, and 1751 from contemporary documents, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102(4), 1639–1653.
- Yamazaki Y, Kowalik Z, Cheung KF (2009) Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and runup. *Int J Numer Methods Fluids* 61(5):473–497.
- Yamazaki Y, Cheung KF, Kowalik Z (2011a) Depth-integrated, non-hydrostatic model with grid nesting for tsunami generation, propagation, and run-up. *Int J Numer Meth Fluids* 67:2081–2107.