

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**EVALUACIÓN DEL DAÑO ECONÓMICO A LAS EDIFICACIONES DE LA COMUNA
DE MEJILLONES A PARTIR DE MÚLTIPLES ESCENARIOS DE TSUNAMI**

GONZALO BRAVO O.¹
JOAQUÍN MORIS B.^{2 4}
JUAN GONZALEZ C.^{3 4}

RESUMEN

Este estudio evalúa el impacto económico de tsunamis en la infraestructura residencial de Mejillones, aplicando un enfoque basado en escenarios estocásticos. Se utilizó el modelo numérico NEOWAVE para simular la inundación por tsunami y se utilizaron curvas de fragilidad para estimar la probabilidad de daño en la infraestructura residencial. Los resultados indican una alta vulnerabilidad de las viviendas para sismos de magnitudes Mw 8,4 a 9,0 con un gran potencial daño económico en las viviendas. La información obtenida contribuye al diseño de estrategias de mitigación y preparación frente a eventos tsunamigénicos en la región. La evaluación de pérdidas económicas permite una mejor planificación urbana, gestión del riesgo de desastres y formulación de estrategias de respuesta ante emergencias. Este estudio resalta la importancia de integrar la evaluación de riesgos probabilísticos en la toma de decisiones para mejorar la resiliencia comunitaria.

¹ Estudiante de Magister, Facultad de Ciencias de Ingeniería y Construcción, Universidad Católica del Norte – email: gonzalo.bravo@alumnos.ucn.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica del Norte – email: joaquin.moris@ucn.cl

³ Profesor Asistente, Escuela de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello – email: juan.gonzalez.c@unab.cl

⁴ Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN).

1. INTRODUCCIÓN

Los tsunamis representan una amenaza significativa para la comuna de Mejillones debido a su cercanía a la zona de subducción entre las placas de Nazca y Sudamericana, con potencial de generar terremotos de gran magnitud, como el ocurrido en 1877 (Mw 8,7), el cual generó un tsunami que se estima que puede haber inundado hasta unos 21 metros sobre el nivel medio del mar en Mejillones. Este evento ha sido utilizado como caso de referencia en diversas investigaciones para caracterizar el comportamiento de fuentes sísmicas en el norte de Chile (Carvajal et al., 2017; Ruiz et al., 2014). La exposición a eventos sísmico-tsunamigénicos se ve agravada por la vulnerabilidad estructural de las edificaciones, compuesto mayoritariamente por viviendas de materialidad liviana, sistemas constructivos tradicionales y emplazamientos bajo la cota de 30 msnm.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el daño económico que un tsunami podría causar a la infraestructura residencial en la comuna de Mejillones, considerando distintos escenarios de sismos tsunamigénicos con magnitudes sísmicas entre Mw 8,4 y Mw 9,0.

2. METODOLOGÍA

Se aplicó una metodología que combina simulaciones numéricas hidrodinámicas, información geoespacial, curvas de fragilidad y técnicas de análisis de riesgo probabilístico. La simulación de la propagación y dinámica del tsunami fue realizada mediante el modelo numérico NEOWAVE, considerando la interacción no lineal entre batimetría, topografía y características del flujo. La evaluación del daño se realizó a partir de curvas de fragilidad para tsunami, elaboradas a partir de tsunamis pasados. Estas curvas permiten establecer una relación entre la profundidad máxima de inundación y la probabilidad de ocurrencia de daño en edificaciones, para cuantificar el daño económico derivado de los tsunamis. Los procesos metodológicos son:

1. Delimitar el área de estudio en un entorno SIG utilizando el software QGIS usando las Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU). Estas cartas, basadas en modelos de propagación de tsunamis, permiten identificar y delimitar las zonas potencialmente inundables.
2. Identificar la materialidad predominante de las edificaciones afectadas, con el propósito de seleccionar la curva de fragilidad estructural correspondiente.
3. Asignar atributos de avalúo fiscal y valor de construcción a las edificaciones ubicadas dentro de la zona inundable. Para ello, se utiliza la base de datos obtenida de los registros del Mapa de Cartografía Digital del Servicio de Impuestos Internos (SII), permitiendo vincular espacialmente cada edificación en QGIS con su respectiva información catastral.
4. Definir magnitudes sísmicas plausibles a partir del análisis de registros históricos de sismicidad, la estimación del momento sísmico acumulado en función de tasas de deformación y la segmentación sismotectónica del margen convergente. Este enfoque permite caracterizar escenarios sísmicos representativos para cada segmento tectónico, considerando su potencial de ruptura y capacidad de liberación de energía sísmica.

5. Simular la propagación del tsunami mediante modelación numérica con el modelo NEOWAVE, considerando múltiples escenarios sismo-tsunamigénicos. El modelo permite estimar la profundidad máxima de inundación en el área de estudio, cuyos resultados fueron espacialmente vinculados con las edificaciones para evaluar su exposición al impacto del tsunami.
6. Aplicar curvas de fragilidad para estimar la probabilidad de daño en las edificaciones según su materialidad estructural y número de pisos, en función de la profundidad máxima de inundación. Esta probabilidad se utiliza como factor multiplicador del valor de construcción para estimar el daño económico probable (DPT) asociado a cada edificación.
7. Estimar el DPT de cada escenario sumando el daño estimado para cada edificación. A partir de estos resultados, construir un histograma que muestre la frecuencia de valores de DPT por escenario, utilizando intervalos de 5 mil millones de pesos chilenos, para cada Mw analizada.
8. Normalizar el histograma correspondiente a cada Mw para obtener la frecuencia relativa de cada rango de costo probable total. Luego, ajustar distribuciones probabilísticas a estos datos con el fin de caracterizar el daño económico probable total para cada diferentes escenarios sísmicos considerados (Mw 8,4 - 9,0).
9. Estimar la probabilidad de ocurrencia anual de sismos según su magnitud de momento (Mw), aplicando la ley de Gutenberg-Richter a partir de registros históricos en la zona.
10. Obtener la probabilidad de daño económico para cada rango de magnitud M_j mediante el producto entre la probabilidad de daño condicionada a M_j y la probabilidad de ocurrencia del escenario sísmico $P(M_j)$. Posteriormente, sumar las contribuciones de todos los escenarios para estimar la probabilidad anual de daño económico por tsunami en el rango de magnitudes analizado (Mw 8,4 – 9,0).

Delimitación espacial y caracterización de información predial georreferenciada

Se construyó una base predial georreferenciada para la comuna de Mejillones mediante polígonos en QGIS. A partir de la cartografía del Servicio de Impuestos Internos (SII), se delimitaron 2.796 predios individuales como se muestra en la Figura 1.

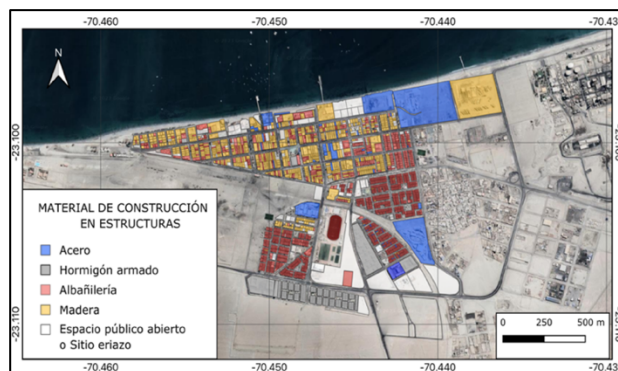


Figura 1. Mapa materialidad de las viviendas de Mejillones.

Cada unidad predial fue vinculada a su número de rol, valor de terreno y avalúo fiscal, además de información sobre su materialidad estructural, obtenida mediante solicitud formal al SII vía Ley de Transparencia. Esta información fue incorporada como atributos en el entorno SIG. El análisis evidenció una predominancia de viviendas con estructuras de madera, seguidas por construcciones de albañilería confinada.

Simulación estocástica de escenarios sísmico-tsunamigénicos

Se desarrolló simulaciones estocásticas de escenarios sísmico-tsunamigénicos para la zona de Mejillones, basada en el modelo propuesto por González et al. (2020) para Iquique, adaptado al área de estudio. Este modelo utiliza el teorema de Karhunen-Loève para generar eventos con magnitudes entre Mw 8,4 y Mw 9,0, considerando la variabilidad de las brechas sísmicas entre el sur de Perú y el norte de Chile. Se definieron cuatro conjuntos de rupturas sísmo-tsunamigénicas para la zona norte de Chile: 280 escenarios para Mw 8,4; 278 para Mw 8,6; 429 para Mw 8,8; y 257 para Mw 9,0. La ubicación de los hipocentros de cada escenario se presenta en la Figura 2.

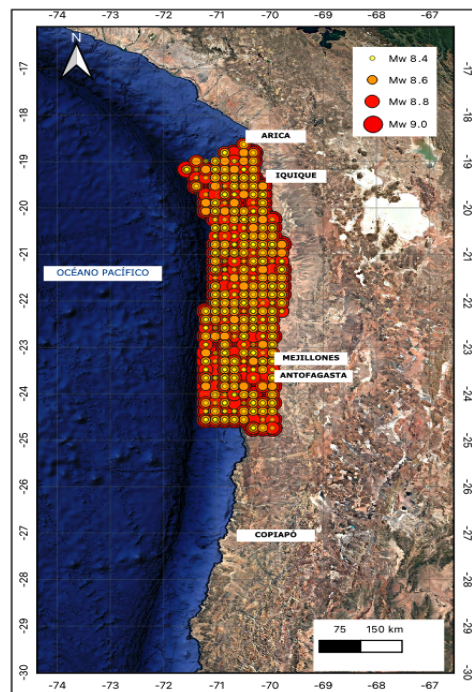


Figura 2. Mapa de ubicación de fuentes sísmicas simuladas para magnitudes Mw 8,4 – Mw 8,6 – Mw 8,8 – Mw 9,0.

Las dimensiones de la zona de ruptura (longitud y ancho) se generan estocásticamente a partir de distribuciones log normales derivadas de las leyes de escalamiento de Blaser et al. (2010), permitiendo capturar la variabilidad natural de los eventos. La geometría de cada escenario se construye seleccionando aleatoriamente el hipocentro dentro del espacio discretizado, definiendo así el área de ruptura coherente con las dimensiones estimadas.

La variabilidad espacial del deslizamiento se modela mediante un vector normal multivariado, con medias y covarianzas que siguen la metodología propuesta por Melgar et al. (2016), lo que garantiza distribuciones espacialmente coherentes necesarias para simular con precisión el

levantamiento del fondo marino y la generación del tsunami. Las fuentes sísmicas se distribuyen en tres dominios de profundidad (A, B y C), conforme a Lay et al. (2012), lo que permite incorporar variaciones en el comportamiento de ruptura y mejorar la representación del proceso tsunamigénico en la zona de subducción del norte de Chile.

Simulación numérica de tsunami mediante el modelo NEOWAVE

Se realizaron simulaciones numéricas de tsunamis empleando el modelo NEOWAVE (Yamazaki et al., 2009), utilizando cuatro niveles de mallas anidadas. Los datos batimétricos para los niveles 1 y 2 provienen de la Carta Batimétrica General de los Océanos (GEBCO), para los niveles 3 y 4 se utilizaron cartas náuticas locales combinadas con batimetría detallada proporcionada por el Ministerio de Obras Públicas (MOP) y topografía LIDAR de alta resolución proporcionada por el proyecto JICA-SATREPS, siendo procesados mediante el software Generic Mapping Tools (GMT) según González et al. (2020). Las simulaciones consideraron un tiempo total de propagación de cuatro horas, con pasos de tiempo ajustados a la resolución de cada nivel de malla; Nivel 1: resolución de ~3600 m., abarcó la región comprendida entre el centro de Perú (~14°S) y el centro de Chile (~28°S), permitiendo modelar la deformación inicial del fondo marino y la propagación principal del tsunami a lo largo de la costa. Nivel 2: resolución ~ 900 m; Nivel 3 resolución ~ 180 m., describe la escala local de la posible resonancia de la plataforma y la pendiente de las ondas de tsunami; Nivel 4: resolución ~30 m., se utilizó para analizar la variabilidad local de los procesos de inundación a lo largo de la costa. Se determinó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,025 representativo del fondo oceánico.

Determinación de la probabilidad de ocurrencia para el daño en las edificaciones para cada escenario

Para representar la vulnerabilidad de las edificaciones se utilizaron curvas de fragilidad, la cuales proporcionan la probabilidad de un cierto nivel de daño para una profundidad máxima de inundación dada. Se eligió la curva de fragilidad para materialidad mixta (madera + albañilería confinada) desarrollada para el tsunami de Coquimbo 2015 por Aránguiz et al. (2018), tomando en cuenta que el 90% de las edificaciones en Mejillones corresponde a estructuras de esta materialidad, con uno o dos pisos. Para estructuras de hormigón armado y acero respectivamente, se eligió las curvas desarrolladas para el tsunami de Japón 2011 por Suppasri et al. (2013), sin considerar estratificación por número de pisos, por lo cual, se tiende a sobreestimar el daño en edificaciones de hormigón armado y acero de 3 o más pisos. Se aplicaron estas curvas de fragilidad para estimar la probabilidad de daño en las edificaciones según su materialidad estructural, en función de la profundidad máxima de inundación en cada predio, obtenida en la simulación para cada escenario de sismo tsunamigénico analizado.

Determinación del daño económico total en la infraestructura residencial para cada escenario

Para el cálculo del daño económico estimado en las edificaciones, se utilizó el producto entre la probabilidad de daño estructural y el valor fiscal de construcción de cada predio. Este criterio es similar al método N°1 utilizado por Wiebe et al. (2014). La probabilidad de daño (P_i) se determinó a partir de curvas de fragilidad para tsunamis, mientras que el valor de la edificación (V_i) corresponde a la diferencia entre el avalúo fiscal del bien raíz y el valor del terreno. Así, el daño probable individual (DP_i) para la i -ésima edificación se expresa mediante la siguiente relación:

$$DP_i = P_i \cdot V_i \quad (1)$$

P_i : Probabilidad de daño obtenida a partir de curvas de fragilidad para la i -ésima edificación.

V_i : Avalúo fiscal de la construcción de la i -ésima edificación.

El daño económico total (de todo el territorio de Mejillones) asociado a un escenario de inundación se calculó mediante el método N°1 desarrollado por Wiebe et al. (2014), como la suma del daño individual estimado en todos los predios analizados, lo que permite estimar el impacto económico potencial del evento tsunamigénico modelado sobre la infraestructura residencial:

$$DPT = \sum_{i=1}^N DP_i \quad (2)$$

DP_i : Daño probable en cada bien raíz.

N : Cantidad total de bienes raíces considerados. En total $N=2.796$ predios.

Ajuste probabilístico del daño económico total mediante modelos de distribución

Se construyeron histogramas del Daño Probable Total (DPT) para cada magnitud de momento, como se muestra en las Figuras 3 – 4 – 5 – 6. Se analizó la frecuencia de escenarios en intervalos de daño económico de 5.000 millones de pesos, con el fin de caracterizar la distribución probable de costos en cada escenario sísmico. Los histogramas fueron normalizados a la frecuencia relativa, para estimar la probabilidad anual de excedencia de costos por daño en las edificaciones de Mejillones para una magnitud de momento sísmico dada.

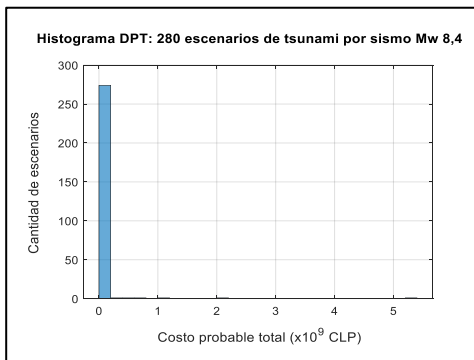


Figura 3. Histograma de DPT asociado a 280 escenarios de tsunami por sismo Mw 8,4.

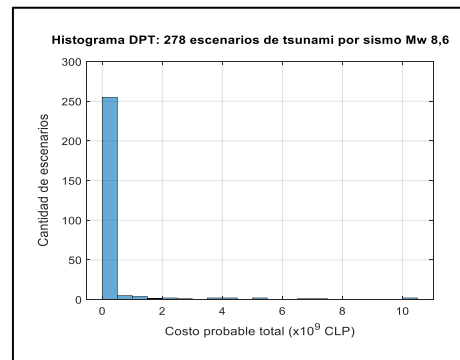


Figura 4. Histograma de DPT asociado a 278 escenarios de tsunami por sismo Mw 8,6.

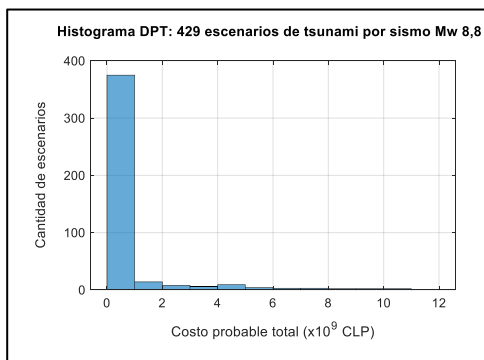


Figura 5. Histograma de DPT asociado a 429 escenarios de tsunami por sismo Mw 8,8.

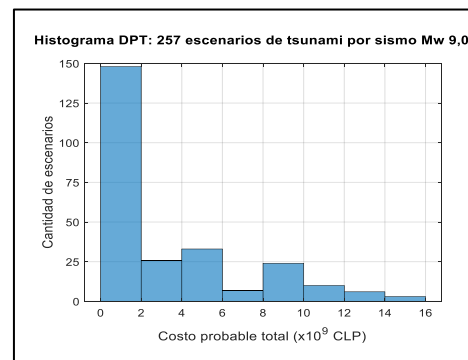


Figura 6. Histograma de DPT asociado a 257 escenarios de tsunami por sismo Mw 9,0.

Se ajustó los datos de los histogramas normalizados por método de máxima verosimilitud. Para seleccionar la distribución que mejor representa el comportamiento de los datos, se empleó el criterio de información de Akaike (AIC), con el cual se evalúa la calidad relativa de los modelos estadísticos, penalizando la complejidad del modelo. El AIC se define como:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (3)$$

k : Número de parámetros del modelo estadístico.

L : Máximo valor de la función de verosimilitud para el modelo.

Se selecciona como modelo óptimo aquel que presenta el menor valor de AIC, indicando un mejor equilibrio entre ajuste y complejidad. Tras la comparación entre diferentes distribuciones, se determinó que la distribución gamma ofrece el mejor ajuste a los datos, presentando el menor valor de AIC entre los modelos evaluados.

Determinación de la probabilidad de ocurrencia anual de sismos según cierto rango de magnitud de momento (M_w)

La probabilidad de ocurrencia de sismos se fundamenta en la ley de recurrencia de magnitud sísmica, también conocida como la relación de Gutenberg-Richter, la cual permite establecer una relación entre la frecuencia de ocurrencia de los eventos sísmicos y su magnitud, considerando el registro público de terremotos que registra el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para la zona frente a la costa del norte de Chile (Ec.4). Se determinó el número de sismos ocurridos mayores a una magnitud mínima definida (m_0) y se generó una gráfica en función de M_w en \log_{10} como se muestra en la Figura 7.

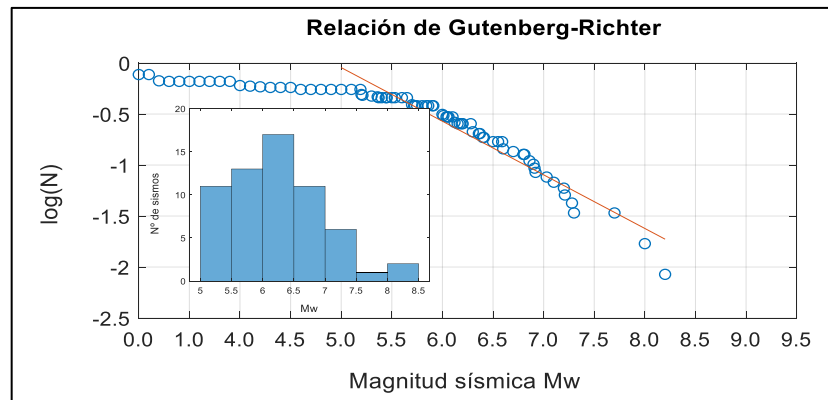


Figura 7. Relación de recurrencia de Gutenberg-Richter.

$$\log_{10}(N) = a - bm \quad (4)$$

N : Recurrencia anual de sismos de magnitud mayor a m_0 .

a, b : Coeficientes que caracterizan la sismicidad de la región.

La ecuación 5 representa la función de distribución acumulada $F_M(m)$ de la magnitud sísmica M , que indica la probabilidad de que la magnitud de un sismo seleccionado al azar sea menor que un valor m en un determinado año, bajo la condición de que m se encuentre en el intervalo $[m_0, m_{max}]$.

$$F_M(m) = P[M < m | m_o < m < m_{max}] = \frac{1 - e^{-\beta(m - m_o)}}{1 - e^{-\beta(m_{max} - m_o)}} \quad (5)$$

$$\beta = b \cdot \ln(10) \quad (6)$$

- M : Magnitud de un sismo (Mw) considerada como variable aleatoria continua.
 m : Umbral de magnitud para evaluar la probabilidad acumulada.
 m_o : Magnitud mínima incluida en el catálogo de sismos analizado.
 m_{max} : Magnitud máxima físicamente plausible.
 β : Parámetro de pendiente de la ley exponencial de Gutenberg – Richter.
 b : Parámetro de pendiente del ajuste lineal para el catálogo de sismos analizado.

Se ajustó la mejor recta mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados, obteniendo los parámetros indicados en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros ajuste lineal.

a	b	α	β	R ²
2,5844	0,5254	5,95	1,21	0,94

La Figura 8 presenta la distribución de probabilidad para la ocurrencia de un sismo de una determinada magnitud m , considerando ésta se encuentra en el rango $m_o < m < m_{max}$, donde $m_o = 5$ y $m_{max} = 9,5$.

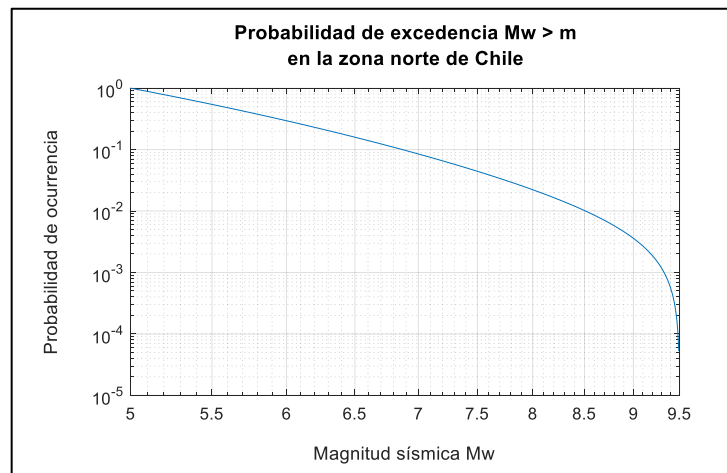


Figura 8. Función de distribución de probabilidad de excedencia de una cierta magnitud sísmica Mw, en un determinado año.

Determinación de la probabilidad de ocurrencia anual de daño en las edificaciones de Mejillones producto de la ocurrencia de un sismo tsunamigénico

Para incorporar la variabilidad sísmica se aplica el teorema de probabilidad total. Este enfoque considera la sumatoria de los productos entre la probabilidad condicional de daño económico dado un escenario de sismo tsunamigénico de magnitud m_j , y la probabilidad de excedencia anual de un sismo de dicha magnitud (Ec.7).

$$P(DPT) = \sum_{j=1}^n P(DPT | M = m_j) \times P(M = m_j) \quad (7)$$

j : Corresponde a la j -ésima magnitud de momento sísmico considerada.

Dado que estas probabilidades corresponden a magnitudes discretas, se asigna a cada magnitud, un intervalo probabilidad de excedencia, calculada como la diferencia entre las probabilidades acumuladas de las magnitudes adyacentes. De esta forma, para la magnitud Mw 8,4 se utiliza la diferencia entre las probabilidades asociadas a Mw 8,5 y Mw 8,3, aplicando el mismo criterio para Mw 8,6, Mw 8,8 y Mw 9,0, el cual se muestra en la Figura 9.

$$P(M = m_j) \sim P(m_{j-1} < M < m_{j+1}) = P(M < m_{j+1}) - P(M < m_{j-1}) \quad (8)$$

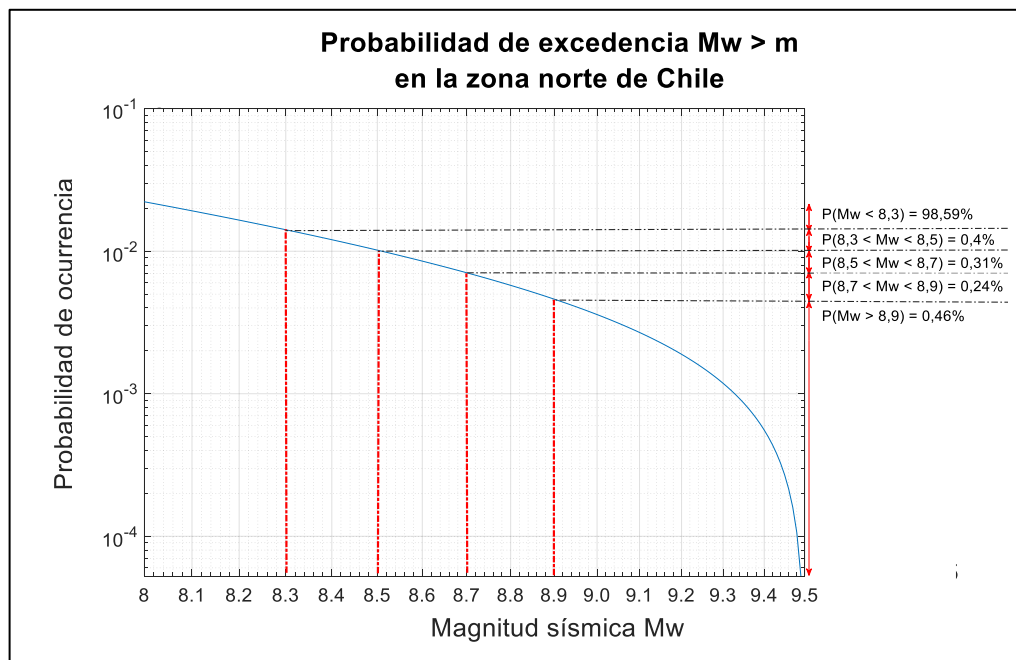


Figura 9. Intervalos de probabilidad de excedencia para magnitudes de momento Mw analizadas.

Los intervalos de probabilidad de excedencia para sismos de magnitudes Mw 8,4 – Mw 8,6 – Mw 8,8 – Mw 9,0 se representan en la Tabla 2.

Tabla 2. Probabilidad de excedencia por intervalos para Mw.

j	Magnitud sísmica usada en la simulación (Mw)	Intervalo de probabilidad	Probabilidad de excedencia (P)
1	8,4	$P(8,3 < M_w < 8,5)$	0,4%
2	8,6	$P(8,5 < M_w < 8,7)$	0,31%
3	8,8	$P(8,7 < M_w < 8,9)$	0,24%
4	9,0	$P(M_w \geq 8,9)$	0,46%

3. RESULTADOS

El desarrollo de este estudio abarca escenarios sísmico-tsunamigénicos con magnitudes de momento Mw 8,4 - Mw 8,6 - Mw 8,8 - Mw 9,0. Se definieron tres rangos de magnitud sísmica. En primer lugar, para magnitudes menores a Mw 8,3 se asumió daño nulo, ya que los registros instrumentales y modelaciones indican que estos tsunamis no provocan inundación terrestre en la zona urbana de Mejillones (Catalán et al., 2015; Gusman et al., 2015). Para el rango entre Mw 8,3 y Mw 9,0 se simularon distintos escenarios y se estimó el daño estructural de manera detallada. Finalmente, para magnitudes superiores a Mw 9,1, aunque es posible que ocurran, no se modelaron explícitamente debido a las altas exigencias computacionales. Por esta razón, se decidió asignarles el mismo nivel de daño que al escenario Mw 9,0. No obstante, los autores reconocen que en futuras investigaciones se deberán incluir estas magnitudes extremas para una evaluación más completa del daño. La Figura 10 presenta las curvas de probabilidad de excedencia anual ajustadas con distribución Gamma para los cuatro escenarios sísmico-tsunamigénicos evaluados de magnitudes Mw 8,4 – Mw 8,6 – Mw 8,8 – Mw 9,0.

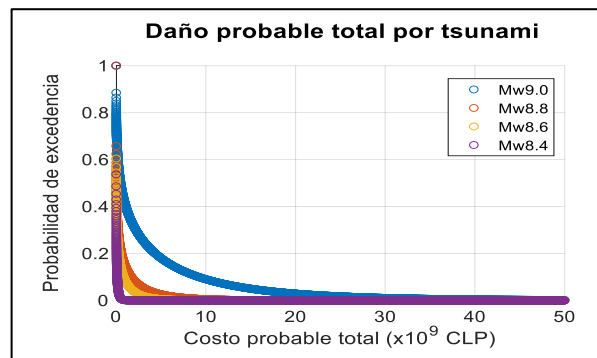


Figura 10. Distribución gamma para el daño probable total por tsunami para escenarios Mw 8,4 – Mw 8,6 – Mw 8,8 – Mw 9,0.

El resultado considerando la probabilidad de daño total por tsunami junto con el intervalo de excedencia respectivo (Ec. 8), se ilustra en la Figura 11 en escala logarítmica, con lo cual se obtuvo una distribución de probabilidad de excedencia en un determinado año, correspondiente a un rango de costo probable total, dado el arribo de un tsunami de magnitud sísmica entre Mw 8,4 y Mw 9,0.

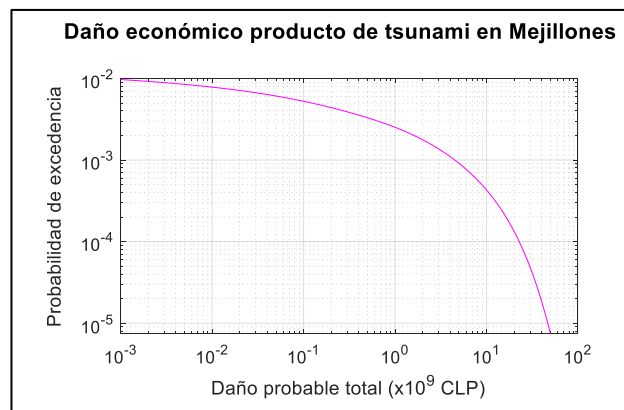


Figura 11. Distribución de probabilidad de excedencia del daño económico total producto de un tsunami para un determinado año, en escala logarítmica de base 10.

4. CONCLUSIONES

1. Las simulaciones de tsunami muestran que la franja de inundación cubre el casco histórico de Mejillones al encontrarse dentro de la zona bajo cota 30 msnm., sector dominado por viviendas de madera y albañilería confinada, tipologías estructuralmente vulnerables frente a tsunamis. Para una misma magnitud sísmica, las variaciones en los parámetros de la fuente dan lugar a resultados de daño con una alta variabilidad: algunos escenarios alcanzan niveles de daño elevado, mientras que otros prácticamente no presentan daño.
2. La combinación de modelos numéricos con curvas de fragilidad desarrolladas a partir de eventos reales y analizadas para distintos materiales estructurales, permite estimar el riesgo de daños por tsunami en Mejillones.
3. El análisis del daño económico muestra que, si bien la mayoría de los tsunamis simulados causaría pérdidas moderadas, existe un grupo reducido de escenarios de baja frecuencia que podría generar daños de gran magnitud. Estos eventos, aunque poco probables, representan una parte relevante del riesgo económico total de la comuna y reflejan que se trata de un riesgo de baja frecuencia, pero alto impacto. Por ejemplo, para que el daño sea al menos 10 mil millones de pesos, la probabilidad es de 0,045% para un año dado, obtenido de la Figura 11.
4. Las pérdidas económicas se estimaron a partir del avalúo fiscal de las edificaciones, criterio inferior al valor de mercado o al costo de reposición, por lo cual, los resultados deben leerse como una aproximación menor del daño económico real. La principal contribución de este trabajo es documentar una metodología para la evaluación del daño económico, compatible con distintos escenarios de amenaza y exposición. Futuros desarrollos incorporarán costos de reposición actualizados y pérdidas indirectas, con el fin de acotar la incertidumbre y aproximar el costo total real.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento entregado a los investigadores Joaquín Moris y Juan González a través del fondo ANID/FONDAP/15110017 (CIGIDEN) y también se agradece el financiamiento entregado al investigador Joaquín Moris mediante el concurso interno de la Universidad Católica del Norte “Iniciación a la Investigación 2023”.

REFERENCIAS

- Aránguiz, R., Urra, L., Okuwaki, R., & Yagi, Y. (2018). Development and application of a tsunami fragility curve of the 2015 tsunami in Coquimbo, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2143–2160. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2143-2018>.
- Blaser, L., Krüger, F., Ohrnberger, M., & Scherbaum, F. (2010). Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 2914–2926. <https://doi.org/10.1785/0120100111>.

Carvajal, M., Cisternas, M., Gubler, A., Catalán, P. A., Winckler, P., & Wesson, R. L. (2017). Reexamination of the magnitudes for the 1906 and 1922 Chilean earthquakes using Japanese tsunami amplitudes: Implications for source depth constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *122*(1), 4–17. <https://doi.org/10.1002/2016JB013269>.

Catalán, P. A., Aránguiz, R., González, G., Tomita, T., Cienfuegos, R., González, J., Shrivastava, M. N., Kumagai, K., Mokrani, C., Cortés, P., & Gubler, A. (2015). The 1 April 2014 Pisagua tsunami: Observations and modeling. *Geophysical Research Letters*, *42*(8), 2918–2925. <https://doi.org/10.1002/2015GL063333>.

González, J., González, G., Aránguiz, R., Melgar, D., Zamora, N., Shrivastava, M. N., Das, R., Catalán, P. A., & Cienfuegos, R. (2020). A hybrid deterministic and stochastic approach for tsunami hazard assessment in Iquique, Chile. *Natural Hazards*, *100*(1), 231–254. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03809-8>.

Gusman, A. R., Murotani, S., Satake, K., Heidarzadeh, M., Gunawan, E., Watada, S., & Schurr, B. (2015). Fault slip distribution of the 2014 Iquique, Chile, earthquake estimated from ocean-wide tsunami waveforms and GPS data. *Geophysical Research Letters*, *42*(4), 1053–1060. <https://doi.org/10.1002/2014GL062604>.

Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Koper, K. D., Hutko, A. R., Ye, L., Yue, H., & Rushing, T. M. (2012). Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *117*(4). <https://doi.org/10.1029/2011JB009133>.

Melgar, D., LeVeque, R. J., Dreger, D. S., & Allen, R. M. (2016). Kinematic rupture scenarios and synthetic displacement data: An example application to the Cascadia subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *121*(9), 6658–6674. <https://doi.org/10.1002/2016JB013314>.

Ruiz, S., Metois, M., Fuenzalida, A., Ruiz, J., Leyton, F., Grandin, R., Vigny, C., Madariaga, R., & Campos, J. (2014). Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique Mw8.1 earthquake. *Science*, *320*, 1165–1169. <https://doi.org/10.1126/science.1256074>

Suppasri, A., Mas, E., Charvet, I., Gunasekera, R., Imai, K., Fukutani, Y., Abe, Y., & Imamura, F. (2013). Building damage characteristics based on surveyed data and fragility curves of the 2011 Great East Japan tsunami. *Natural Hazards*, *66*(2), 319–341. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0487-8>.

Yamazaki, Y., Kowalik, Z., & Cheung, K. F. (2009). Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and run-up. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, *61*(5), 473–497. <https://doi.org/10.1002/flid.1952>.

Wiebe, D. M., & Cox, D. T. (2014). Application of fragility curves to estimate building damage and economic loss at a community scale: A case study of Seaside, Oregon. *Natural Hazards*, *71*(3), 2043–2061. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0995-1>.