SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

ANÁLISIS DE LA IMPORTANCIA DE OLAS POSTERIORES DE TSUNAMIS RESPECTO A LA PRIMERA Y COMPARACIÓN DE INTENSIDADES DE MEDIDA EN BAHÍAS RESONANTES Y NO RESONANTES

PAULA BRITO V.¹ PATRICIO A. CATALAN²

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis de la relevancia que tiene la elección de la intensidad de medida de tsunami que se utiliza al momento de caracterizar un tsunami. Para ello, se analizan las diferencias y similitudes que se puede obtener al usar la profundidad de inundación o el flujo de momentum como intensidad de medida de interés. Luego, se analiza cómo es el arribo de olas, diferenciando los casos de una primera ola que genere un mayor de las intensidades de medida, o si es alguna ola posterior. Finalmente, se analiza si ocurren una o varias olas dentro de un mismo evento y lugar asociadas a una alta probabilidad de generar un determinado daño en las estructuras, considerando la condición resonante que tenga la bahía. Para esto, se utilizan dos bahías ampliamente estudiadas con anterioridad, teniendo en cuenta que una es conocida por su alta resonancia (Coquimbo/La Serena) y la otra no (Valparaíso/Viña del Mar). Los resultados indican que el considerar sólo una única ola como causante de daño, es una simplificación poco conservadora y que puede tener repercusiones en la evaluación del impacto del tsunami sobre la infraestructura.

¹ Estudiante Ingeniería Civil, Universidad Santa María - email: <u>paula.britov.12@sansano.usm.cl</u>

² Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, USM, email: patricio.catalan@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los tsunamis tienen un alto potencial de generar daño, de distinto tipo. Si bien el mayor foco de los esfuerzos de mitigación ante tsunamis ha sido orientado a reducir el riesgo asociado a las pérdidas de vida o lesiones, es también relevante el efecto que tiene sobre las estructuras expuestas.

Para caracterizar la amenaza de un tsunami, es necesario definir la Intensidad de Medida de Tsunami (TIM, por su sigla en inglés) con la que se caracteriza el evento y el daño asociado. La TIM más frecuente en la preparación de mapas de amenaza ha sido la Altura de Inundación h(x,y), es decir, el nivel del agua respecto de un nivel de referencia del evento, o la Profundidad de Inundación, d(x,y) que es la distancia vertical entre la altura de inundación y la cota de terreno z(x,y) (Borrero 2005; Mas et al. 2012; Suppasri et al. 2013). Aquí, x e y representan coordenadas horizontales respecto a un punto de referencia. La razón principal para su uso frecuente es la simplicidad de cálculo y confianza en los resultados que se obtienen a partir de modelos numéricos de tsunamis basados en las Ecuaciones No Lineales de Aguas Someras (NLSWE, por su sigla en inglés).

La altura de inundación representa sólo una parte de la dinámica del flujo, por lo que otras TIM tales como el flujo de momentum, $\sim d(u^2+v^2)$, donde u y v son las componentes cartesianas de la velocidad del flujo, podría ser relevantes de ser consideradas. Sin embargo, el problema radica en que hay menos precisión al momento de estimar las velocidades respecto de la precisión obtenida en términos del desplazamiento de la superficie libre (Lynett et al., 2017).

Por otro lado, la caracterización a través de mapas de peligro, implica que frecuentemente el análisis se reduce a un valor único de la TIM, lo que se asocia a sólo una ola del tsunami (típicamente la ola de valor máximo), obviando así que el fenómeno pueda consistir en muchas olas consecutivas. Esta simplificación podría omitir la existencia de esfuerzos cíclicos sobre las estructuras, además de afectar el análisis de riesgos que se realiza para procesos como por ejemplo, la evacuación.

Finalmente, la ocurrencia de múltiples olas y sus características, podría estar condicionada por el comportamiento de los tsunamis en la localidad de interés. En tsunamis recientes en Chile, se ha observado la distinción entre primeros arribos altamente energéticos, y arribos posteriores de gran amplitud, que han sido asociados a condiciones de resonancia de ciertas bahías, por ejemplo, durante el tsunami de Illapel en 2015 (Aránguiz et al., 2016, Paulik et al., 2021). Sin embargo, como este proceso afecta el comportamiento de las TIM no está completamente analizado.

Por lo tanto, en este trabajo se busca realizar un análisis comparativo entre el uso de distintas TIMs, y su efecto sobre la estimación de daño en dos localidades de distinto comportamiento hidrodinámico. Además, se evaluará si el uso de valores máximos o envolventes es suficiente para caracterizar cargas consecutivas sobre la infraestructura, y el rol de la resonancia sobre estos análisis.



Figura 1: Bahía de Coquimbo/La Serena con boyas ubicadas tanto en tierra (rojas) como en la costa por mar (verde).



Figura 2: Bahía de Valparaíso/Viña del Mar con boyas ubicadas tanto en tierra (rojas) como en la costa por mar (verde)

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se analizan las bahías de Coquimbo/La Serena y Valparaíso/Viña del Mar, siendo la primera una bahía caracterizada por tener alta resonancia debida a tsunamis (Aránguiz et al. 2018; Paulik et al. 2021), mientras que la segunda históricamente no ha demostrado tener efectos resonantes (Carvajal et al., 2017). Ambas son zonas de interés a nivel país, con una gran densidad de población en la zona de inundación por tsunami, y por lo tanto han sido estudiadas previamente en distintos trabajos. Las zonas de estudio se muestran en las Figura 1 y Figura 2, en las que se indican además boyas numéricas en las que se analizará la información. Se destacan las boyas 6 y 81 en Coquimbo y Valparaíso, respectivamente, pues serán puntos analizados más detalladamente en este trabajo.

El trabajo se basa en el uso de un modelo numérico de propagación e inundación por tsunami, como elemento de base del análisis. HySea presenta ventajas comparativas con otro tipo de programas basados en las NLSWE, fundamentalmente por su gran velocidad de cómputo debido a la arquitectura GPU y programación en CUDA, estando ampliamente validado (Macías et al. 2016, 2020).

Para modelar apropiadamente se necesita como condiciones de borde las batimetrías de la zona de análisis, bajo la premisa que mientras mayor sea su resolución, los resultados mejoran en precisión. En este caso se utiliza la anidación de 4 grillas anidadas, donde la grilla más fina, que enmarcan las bahías en estudio, tiene una resolución de 7 metros. Estas fueron derivadas de batimetría GEBCO, cartas náuticas de SHOA y de topografía satelital de detalle. Por otra parte, la generación del tsunami representa la estimación de la condición inicial para el modelado, y es fundamental en las características del tsunami resultante. Especialmente relevante es el uso de modelos de

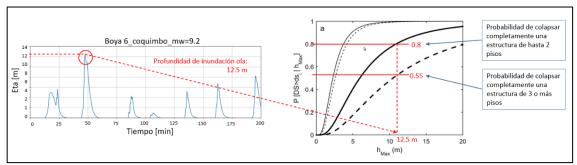


Figura 3: Ejemplo de clasificación de potencial de daño de cada ola asociado a profundidad de inundación. Referencia de curvas de fragilidad: Park et al. (2017)

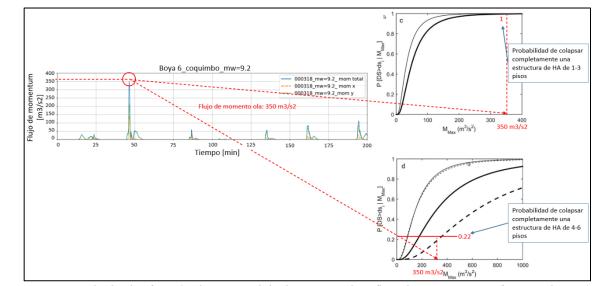


Figura 4: Ejemplo de clasificación de potencial de daño asociado a flujo de momentum. Referencia de curvas de fragilidad: Park et al. (2017)

deslizamiento que no sean uniformes. En este caso, se consideran en el análisis un conjunto de 349 escenarios, de magnitudes Mw=8.6, 8.7, 8.8, 8.9, 9.0, 9.1 y 9.2 con 50 escenarios por cada magnitud, excepto Mw=9.0 con 49 escenarios¹. Los escenarios se generaron con una distribución aleatoria basada en las expansiones de Karhunen-Loeve (Leveque et al., 2016), considerando que todos los escenarios quedan constreñidos espacialmente a un dominio frente a las localidades de interés. Los escenarios son un subconjunto de los escenarios estimados por Zamora et al. (2021). Los análisis consideran un nivel mareal único, dada la condición micromareal de la zona en estudio.

Para todos los casos, se extraen series de tiempo de altura de inundación y de velocidad del flujo, en puntos específicos del dominio (denominados boyas, ver Figuras 1 y 2). Estos se transforman en profundidad de inundación y flujo de momentum. Para el análisis, se utilizan dos enfoques: uno de análisis localizado donde se estudian algunos puntos representativos de las condiciones de cada bahía de tal forma de comparar ambas, específicamente las boyas 6 y 81. El otro enfoque de análisis es global, donde utilizando todos los datos de boyas en tierra y para todos los escenarios modelados, y se cuantifica el efecto que tiene considerar una TIM sobre otra, además del rol de la resonancia de la bahía.

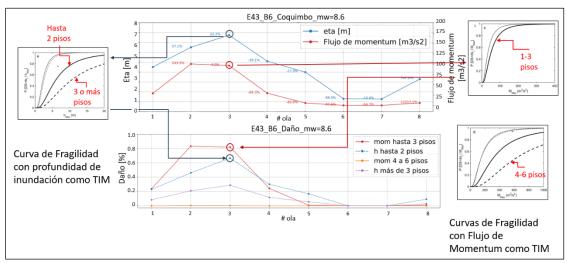


Figura 5: Ejemplo de construcción de gráfico de daño en función del número de ola para una boya y evento específico. Referencia de curvas de fragilidad: Park et al. (2017)

En ambos casos, para la estimación del potencial de daño se utilizan curvas de fragilidad para edificaciones de hormigón armado, como caso representativo. Las curvas de fragilidad son modelos estadísticos generalmente de origen empírico, que permiten estimar la probabilidad de daño (en porcentaje) de un cierto tipo de estructura, dado un cierto valor de un parámetro del flujo. Es este caso, se utilizan como intensidad de medida la profundidad de inundación (para estructuras de hasta 2 pisos) y flujo de momentum (para estructuras de hasta 3 pisos) confeccionadas por Suppasri y FEMA respectivamente, según reportan Park et al., (2017). Las curvas se presentan en las Figuras 3 y 4, en las que se presenta el método de estimación de la probabilidad de daño para la profundidad de inundación, y flujo de momentum, respectivamente.

Para el **análisis localizado** se utiliza un evento específico, a modo de ejemplo, sin perder generalidad. La serie de tiempo continua se convierte a una serie de eventos discretos (olas individuales), que se caracterizan por los valores máximos de las TIMs de cada ola en función del número de ola. Para determinar la cantidad de olas que existe en cada serie de tiempo, se usan las series de tiempo de profundidad de inundación de cada boya, utilizando una variación del método de cruces por cero ascendentes. En la Figura 5 se muestra un caso de ejemplo, en el cual la abscisa indica el número de ola en la secuencia. En el gráfico superior, la ordenada indica el valor de profundidad de inundación (azul) y flujo de momentum. Se indica, además, la variación porcentual de la TIM entre olas consecutivas. En el gráfico inferior se presenta el porcentaje de daño luego de cruzar cada TIM con la curva de fragilidad respectiva.

Para el **análisis global**, se consideran todas las boyas en tierra mostradas en las Figura 1 y Figura 2 junto con todo el conjunto de escenarios En primer lugar, se analiza la comparación de los valores de las TIM de la primera ola en comparación con olas posteriores: para esto se contabiliza la cantidad de veces en que una primera ola tiene mayor profundidad de inundación y/o mayor flujo de momentum que las olas sucesivas. El objetivo es determinar si predomina la primera ola o alguna posterior en cada bahía (o zona de la bahía). Para una mejor visualización de esto, se muestra en términos del porcentaje de casos en que la primera ola supera en magnitud a cualquiera de las olas posteriores, considerando el total de escenarios en que en determinada boya marca inundación.

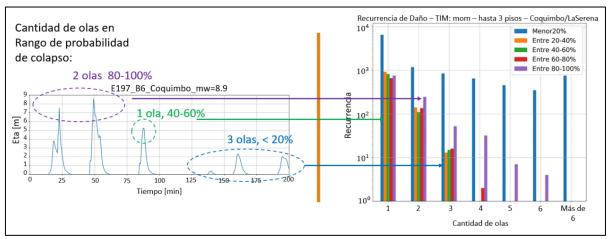


Figura 6: Ejemplo de la construcción de gráficos de recurrencia de olas con potencial de daño.

El segundo enfoque es respecto de la recurrencia de olas con potencial de daño. Para esto se contabiliza el número de olas dentro de un mismo evento-boya, las que se clasifican de acuerdo a la probabilidad de colapsar la estructura. Esta probabilidad de daño además se divide en rangos: menor a 20%, entre 20 y 40%, entre 40 y 60%, entre 60 y 80% y entre 80 y 100%. Esto se presenta gráficamente Figura 6. En ella, las barras azules representan el valor acumulado (entre todas las combinaciones de boyas y eventos), en que una o más olas provocan un daño inferior al 20%, mientras que las barras púrpura indican mas de un 80% de daño. En el ejemplo, se puede apreciar que hay casos con hasta 6 olas (para un mismo evento y lugar) que exceden el umbral de 80% de daño. Al igual que en los casos previos, el análisis se hace para la profundidad de inundación y flujo de momentum.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Localizado

Figura 7 ilustra la profundidad de inundación (denominado eta) y el flujo de momentum (mom) en los ejes ordenados izquierdo y derecho, respectivamente, para la ciudad de Coquimbo, en la boya 6 y un evento de magnitud Mw8.6, como ejemplo representativo. El flujo de momentum se calcula como total, además de sus componentes x e y (longitud y latitud, en este caso), para identificar si una de ellas predomina. La Figura 8: muestra la probabilidad de colapsar completamente la estructura. Se observa que los máximos flujo de momentum y profundidad de inundación no ocurren en la misma ola, y que los cambios porcentuales relativos de la magnitud de TIM entre olas consecutivas son mayores para el flujo de momentum. Por ejemplo, entre la primera ola y la segunda, la profundidad de inundación se incrementa un 57%, mientras que el flujo de momentum

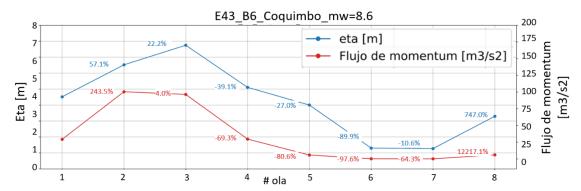


Figura 7: Profundidad de inundación y flujo de momentum en las distintas olas de la boya 6 en la bahía de Coquimbo considerando un sismo de magnitud 8.6.

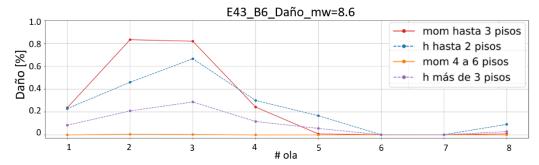


Figura 8: Daño generado por la profundidad de inundación y flujo de momentum en las distintas olas de la boya 6 en la bahía de Coquimbo considerando un sismo de magnitud 8.6.

lo hace un 243%. Esto es el resultado de la no linealidad del flujo de momentum, que depende de $d(u^2+v^2)$. Luego cambios en la magnitud de la velocidad tienen un efecto mayor en el cambio de flujo de momentum que la profundidad de inundación. Esta variación del valor de la TIM entre olas, afecta la estimación de la probabilidad de colapso total de la estructura. En la Figura 8 se puede ver que la estimación con el flujo de momentum no sólo arroja una mayor probabilidad de colapso total (81%, en rojo) que en el caso de estimación con base en la profundidad (62%, en azul), sino que además ocurre durante la segunda ola para momentum, pero en la tercera para profundidad de inundación. Además, es muy relevante el hecho de que dos olas consecutivas generan probabilidades de daño similares para momentum (más de 80%), mientras que la estimación aumenta entre la segunda y la tercera ola para la profundidad, desde un 50% a 62%. Esto es crítico, puesto que indica posibilidades de impacto repetido con estructuras con daño previo, lo que no está considerando en estudios actuales que consideran solo el valor máximo o envolvente.

Haciendo un análisis similar para Valparaíso en la boya 81, se identificó un evento-boya con una profundidad de inundación similar a las presentadas para Coquimbo/La Serena, lo que se observa en las Figura 9: y Figura 10:. En este caso, la profundidad de inundación la TIM presenta un nivel de daño similar que en el caso del momentum. Esto indica que al momento de caracterizar un tsunami, no es posible contar con una definición a priori, ya que podría ser relevante tanto la profundidad de inundación como el flujo de momentum, dependiendo del evento y tipo de bahía.

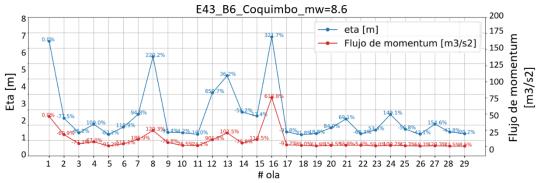


Figura 9:: Profundidad de inundación y flujo de momentum en las distintas olas de la boya 81 en la bahía de Valparaíso considerando un sismo de magnitud 9.2.

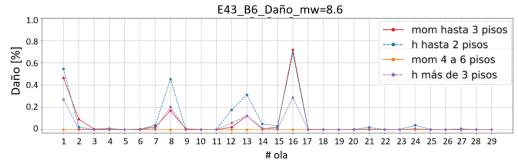


Figura 10: Daño generado por la profundidad de inundación y el flujo de momentum en las distintas olas de la boya 81 en la bahía de Valparaíso considerando un sismo de magnitud 9.2.

Es importante mencionar que de la revisión de todos los casos, se observó que es poco frecuente para Valparaíso/Viña presentar múltiples olas con alto potencial de daño en un mismo evento que para Coquimbo/La Serena. Por otra parte, se observan valores de flujo de momentum considerablemente menores que en Coquimbo/La Serena, incluso para valores de profundidad de inundación similares (como lo es en el caso de la segunda ola en Coquimbo/La Serena en comparación con la octava ola en Valparaíso/Viña del Mar). Finalmente se observa una mayor cantidad de olas que en Coquimbo/La Serena, pero generalmente de menor magnitud en sus TIMs. Estas diferencias se correlacionan preliminarmente con la resonancia de la bahía, que es mayor en Coquimbo que en Valparaíso (Cortés y Catalán, 2016). El alto número de olas en Valparaíso es debido a variaciones menores de la profundidad de inundación no relacionadas con resonancia a nivel de la bahía.

Análisis Global

En los Figura 11: y 12 muestran en las abscisas el número identificador de las boyas en tierra que marcan inundación (en ambos casos, la numeración va de sur a norte). En las ordenadas, a la izquierda el porcentaje – asociado a las barras – de casos en que la primera ola tiene un valor TIM mayor que en las olas posteriores (profundidad de inundación en azul, flujo de momentum en rojo), mientras que a la derecha – asociado a las curvas rojas y azules – se muestra la cantidad de veces en que cada boya marca inundación respecto al número total de escenarios (349). Es importante destacar, que estos gráficos no indican si los valores de TIM de la primera ola en relación con las

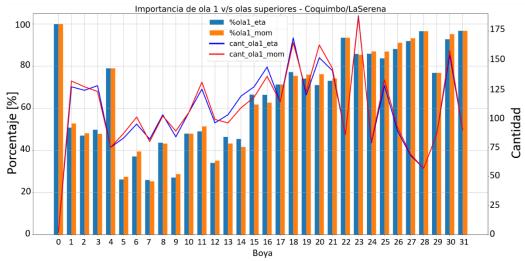


Figura 11: Importancia de la primera ola v/s las posteriores evaluando la profundidad de inundación y flujo de momentum en cada boya por tierra en la bahía de Coquimbo/La Serena.

posteriores son comparables o si hay una diferencia significativa. Valores cercanos al 100% indican que la primera ola predomina, mientras que valores bajos indican que olas posteriores son las que dominan.

La Figura 11: muestra cómo hay una zona de la bahía de Coquimbo/La Serena en donde es frecuente que las olas posteriores sean de mayor intensidad, boyas 1 -- 21, lo cual es coincidente con la presencia de un antinodo del modo fundamental de la bahía (Cortés y Catalán., 2016). Es notable además que la distribución de daño del evento de 2015 (Paulik et al, 2021), también coincide con esta estructura espacial. Por el contrario, la Figura 12 muestra que para Valparaíso/Viña, predomina el efecto de la primera ola, con excepción de 2 boyas específicas (79 y 123). A partir de estos gráficos también se observa (ver líneas), que Coquimbo/La Serena tienen una mayor cantidad de eventos que generan inundación en una mayor cantidad de puntos dentro de la bahía, lo que podría deberse a las características topográficas de cada bahía.

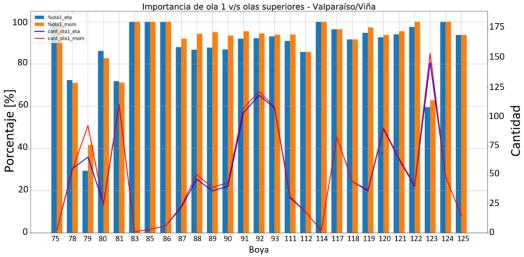


Figura 12:: Importancia de la primera ola v/s las posteriores evaluando la profundidad de inundación y flujo de momentum en cada boya por tierra en la bahía de Valparaíso/Viña del Mar.

Para determinar el efecto de la recurrencia de olas en un mismo evento-boya, se utilizan las curvas de fragilidad contabilizando el número de olas dentro de un mismo evento-boya que están dentro un mismo rango de probabilidad de colapsar la estructura. Esto es importante ya que indica la posibilidad de que varias olas de gran intensidad inunden y e incidan sobre una estructura determinada, lo que tiene como consecuencia que la estructura se vea sometida a esfuerzos cíclicos. Por lo tanto, es posible que una ola genere daño y poco tiempo después haya una segunda ola (o más) que impacten la estructura ya dañada, lo cual normalmente no es considerado.

Esto se muestra para Coquimbo/La Serena en las Figura 13: yFigura 15:; y Figura 14: y Figura 16: para Valparaíso/Viña del Mar. Se observa que existen casos con hasta seis o más olas con una alta probabilidad de colapsar completamente una estructura en Coquimbo/La Serena (entre 80 y 100% si se considera flujo de momentum como TIM), mientras que en Valparaíso/Viña del Mar hay algunos casos con hasta dos o tres olas con una alta probabilidad de colapsar una estructura, pero son menos frecuentes. Esta diferencia sugiere que el comportamiento hidrodinámico del tsunami difiere entre ambas bahías y que esto tiene relevancia en los esfuerzos a los que podrían ser sometidas las estructuras. Información anecdótica en Coquimbo, para 2015, mostró hasta tres marcas de agua distintas al interior de edificios, lo que valida indirectamente los resultados.

En ambas bahías se observa que el flujo de momentum es la TIM que entrega resultados de mayor amenaza, debido a la combinación de velocidades y alturas que pueden confluir para mayor amenaza.

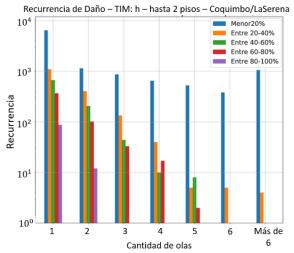


Figura 13:: Recurrencia de olas en un mismo evento-boya con inundación en tierra en la bahía de Coquimbo/La Serena utilizando como TIM la profundidad de inundación en edificaciones de hasta 2 pisos.

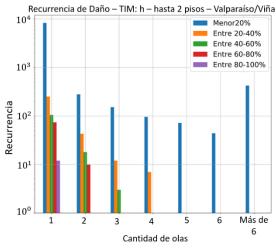


Figura 14:: Recurrencia de olas en un mismo evento-boya con inundación en tierra en la bahía de Valparaíso/Viña del Mar utilizando como TIM la profundidad de inundación en edificaciones de hasta 2 pisos.

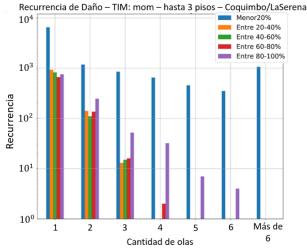


Figura 15: Recurrencia de olas en un mismo evento-boya con inundación en tierra en la bahía de Coquimbo/La Serena utilizando como TIM el flujo de momentum en edificaciones de hasta 3 pisos.

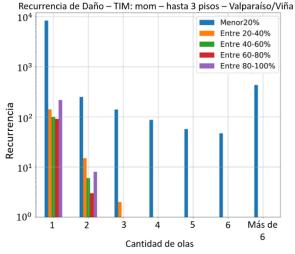


Figura 16:: Recurrencia de olas en un mismo evento-boya con inundación en tierra en la bahía de Valparaíso/Viña del Mar utilizando como TIM el flujo de momentum en edificaciones de hasta 3 pisos.

4. CONCLUSIÓNES

A partir del trabajo realizado se comprueba que es relevante, para efectos de la evaluación de la amenaza, la determinación de la TIM que se considere. Los resultados presentes sugieren que el flujo de momentum suele ser una TIM de asociada a una mayor amenaza, pero no es posible definirlo como regla general. De esta manera, se sugiere el análisis simultáneo de ambas TIM.

También se verifica que la identificación de la TIM relevante depende de variabilidad local, asociada a la configuración de la bahía, específicamente su patrón de resonancia. Si bien esto se explora solo de manera cualitativa en el presente trabajo, existen elementos a destacar. Por una parte, la resonancia incide en el número de olas que podrían afectar con un nivel de daño esperado

a una estructura. Esto resulta en múltiples ciclos de carga en algunos puntos. Además, la resonancia incide en la conformación del flujo de momentum. Esto significa que en algunos casos esto está dominado por la componente cinética, pero en otros por el término asociado a la sección sobre la que se produce el flujo de momentum (asociado a la profundidad de inundación). Es necesario indagar con más detalle el efecto sobre las estructuras en términos de fuerzas de estas diferencias.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de Alejandra Gubler y Natalia Zamora, quienes proporcionaron insumos para poder generar los datos utilizados en el análisis.

REFERENCIAS

- Aránguiz, R., González, G., González, J., Catalán, P. A., Cienfuegos, R., Yagi, Y., Okuwaki, R., Urra, L., Contreras, K., Del Rio, I., Rojas, C., 2016. The 16 September 2015 Chile Tsunami from the Post-Tsunami Survey and Numerical Modeling Perspectives. Pure and Applied Geophysics, Pure and Applied Geophysics 173, 333–348. https://doi.org/10.1007/s00024-015-1225-4
- Aránguiz, Rafael, Luisa Urra, Ryo Okuwaki, and Yuji Yagi. 2018. "Development and Application of a Tsunami Fragility Curve of the 2015 Tsunami in Coquimbo, Chile." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18(8): 2143–60.
- Carvajal, M., M. Cisternas, and P. A. Catalán. 2017. "Source of the 1730 Chilean Earthquake from Historical Records: Implications for the Future Tsunami Hazard on the Coast of Metropolitan Chile." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122(5): 3648–60.
- Cortés A., Pablo, and Patricio Catalán M. 2016. "Atlas de Resonancia de Tsunami." CIGIDEN.
- LeVeque R.J., Waagan K., González F.I., Rim D., Lin G. (2016) Generating Random Earthquake Events for Probabilistic Tsunami Hazard Assessment. In: Geist E.L., Fritz H.M., Rabinovich A.B., Tanioka Y. (eds) Global Tsunami Science: Past and Future, Volume I. Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55480-8 2
- Lynett, P. J., Gately, K., Wilson, R., Montoya, L., Arcas, et al., 2017. Inter-model analysis of tsunami-induced coastal currents. Ocean Modelling, Ocean Modelling 114, 14–32. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.04.003
- Macías, Jorge et al. 2016. "Comparison and Computational Performance of Tsunami-HySEA and MOST Models for LANTEX 2013 Scenario: Impact Assessment on Puerto Rico Coasts." *Pure and Applied Geophysics* 173(12): 3973–97.
- Macías, Jorge, Manuel J. Castro, Sergio Ortega, and José Manuel González-Vida. 2020. "Performance Assessment of Tsunami-HySEA Model for NTHMP Tsunami Currents Benchmarking. Field Cases." *Ocean Modelling* 152(August 2019): 101645. https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101645.
- Park, Hyoungsu, Daniel T. Cox, and Andre R. Barbosa. 2017. "Comparison of Inundation Depth and Momentum Flux Based Fragilities for Probabilistic Tsunami Damage Assessment and Uncertainty Analysis." *Coastal Engineering* 122(December 2016): 10–26. http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.01.008.
- Paulik, Ryan et al. 2021. "The 16 September 2015 Illapel Earthquake and Tsunami: Post-Event Tsunami Inundation, Building and Infrastructure Damage Survey in Coquimbo, Chile." *Pure and Applied Geophysics* (September 2015).
- Zamora, Natalia, Patricio A. Catalán, Alejandra Gubler, and Matías Carvajal. 2021. "Microzoning Tsunami Hazard by Combining Flow Depths and Arrival Times." *Frontiers in Earth Science* 8(April): 1–18.

¹ Se consideran 49 escenarios de magnitud 9.0 solo por la disponibilidad de los datos.