

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**ESTIMACIÓN DE FUERZAS DE TSUNAMI SOBRE UN ROMPEOLAS
MEDIANTE EL TEOREMA DE TRANSPORTE DE REYNOLDS**

FRANCISCO J. SÁEZ¹
PATRICIO A. CATALÁN²
PATRICIO WINCKLER³
ROSITA JÜNEMANN⁴
RONALD ALVAREZ⁵
ALEJANDRO URRUTIA⁶

RESUMEN

Se presenta una novedosa metodología para estimar fuerzas hidrodinámicas inducidas por tsunami sobre estructuras costeras, basada en el Teorema de Transporte de Reynolds (TTR) y en simulaciones numéricas. A diferencia de los enfoques comúnmente utilizados en las normativas, la metodología adopta un enfoque integral que permite calcular la fuerza neta ejercida sobre un volumen de control arbitrario considerando explícitamente tres componentes físicas: presión hidrodinámica, flujo de momentum y variación temporal del momentum. La metodología se aplica para evaluar las fuerzas hidrodinámicas de un tsunami generado por un sismo de Mw 9.0 actuando en el molo de abrigo del puerto de Valparaíso. Se obtienen fuerzas netas a lo largo del rompeolas y se analiza la contribución de cada componente física. Los resultados se comparan con las estimaciones de la normativa japonesa (MLIT, 2020) y estadounidense (ASCE/SEI., 2016), obteniendo una buena correlación con la normativa MLIT y diferencias importantes con el método propuesto por la ASCE. A diferencia de los enfoques normativos, el método propuesto no requiere coeficientes empíricos ni supuestos adicionales para estimar fuerzas inducidas por tsunami, lo que la convierte en una herramienta flexible y físicamente robusta para evaluar la interacción fluido-estructura en entornos costeros.

¹ Investigador Asistente, CIGIDEN - email: fransaezr@gmail.cl

² Profesor Titular, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María – email: patricio.catalan@usm.cl

³ Profesor Titular, Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso, Investigador CIGIDEN y COSTAR – email: patricio.winckler@uv.cl

⁴ Profesora Asociada, Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: rjunemann@uc.cl

⁵ PostDoc, CIGIDEN – email: ronald.alre@cigiden.cl

⁶ Investigador, CIGIDEN – email: Alejandro.urrutia@cigiden.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los tsunamis son eventos naturales de baja frecuencia y gran potencial destructivo, como se evidenció en los tsunamis de 2010 en Chile (Fritz, 2011) y 2011 en Japón (Arikawa, 2012). Debido a su gran altura y velocidad, estos fenómenos pueden generar el colapso total o parcial de la infraestructura del área afectada, con las consecuentes pérdidas económicas (Yeh, 2016). Ante este escenario, se vuelve imperativo contar con estimaciones precisas de las fuerzas hidrodinámicas inducidas por estos eventos, como insumo fundamental para el diseño estructural en zonas expuestas a tsunamis. Sin embargo, la estimación de estas cargas enfrenta importantes desafíos debido a la complejidad del flujo en las cercanías de las estructuras y a la escasez de datos medidos en eventos in situ (Nistor, 2018).

La propagación de tsunamis puede modelarse de forma eficiente mediante las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSWE) cuyos resultados expresados en términos de campos espaciales de velocidad y elevación de la superficie libre (Berger, 2011; Castro, 2015) permiten calcular las fuerzas ejercidas sobre estructuras costeras. Por ejemplo, para el diseño de un rompeolas frente a un tsunami, el estándar japonés (MLIT, 2020) considera únicamente la altura de la columna de agua para calcular la componente hidrostática del flujo, mientras que la norma ASCE/SEI (2016, 2022) emplea expresiones que se nutren de los campos de velocidad y profundidad del flujo para calcular dichas fuerzas. Sin embargo, estas aproximaciones pueden subestimar las fuerzas hidrodinámicas al no excluir los efectos hidrodinámicos locales (Yeh, 2014).

En este contexto, se propone una metodología que combina simulaciones numéricas basadas en NLSWE y una formulación derivada del Teorema de Transporte de Reynolds (TTR), con el objetivo de estimar fuerzas hidrodinámicas a partir de los campos locales de velocidades y superficie libre sobre el rompeolas del Puerto de Valparaíso, comparando los resultados con los entregados por las recomendaciones del MLIT y ASCE/SEI.

2. NORMATIVAS

Las normas y estándares de diseño contemplan procedimientos para estimar en forma conservadora las cargas hidrostáticas y/o hidrodinámicas inducidas por tsunamis sobre rompeolas cuando la superficie libre alcanza su valor máximo.

El estándar MLIT (2020) adopta un enfoque determinista que clasifica la interacción tsunami-estructura en tres casos: i) flujo sin rotura ni sobrepaso, ii) presencia de un *bore* (ola tipo salto hidráulico) y iii) flujo con sobrepaso (*overtopping*). Para el caso i) se considera una distribución de presión trapezoidal con valor máximo al fondo definido por la batimetría, mientras que para el caso ii) se emplea una versión amplificada de esta. En el caso iii), la fuerza se estima como la diferencia de presiones hidrostáticas en la cara frontal y posterior del rompeolas, corregida por coeficientes empíricos. En este trabajo se adopta este último, que representa de mejor manera el caso de estudio y el cual estima la presión como

$$p = \alpha \rho g (\eta + h'), \quad (1)$$

donde α es un coeficiente de amplificación ($\alpha_f = 1.05$) o de reducción ($\alpha_r = 0.9$) dependiendo del sentido de propagación del tsunami, ρ la densidad del fluido, g la aceleración de gravedad, η la elevación de superficie libre y h' la profundidad en el punto de interés respecto a un determinado nivel de referencia. Este método requiere simulaciones del tsunami para estimar η . Sin embargo, no incorpora explícitamente la velocidad ni dirección del flujo, pues asume que este es perpendicular a la estructura.

A diferencia del estándar MLIT, la norma ASCE/SEI 7-16 (2016) y ASCE/SEI 7-22 (2022) establece fórmulas para estimar tanto fuerzas hidrostáticas como hidrodinámicas. La carga hidrostática se calcula como una distribución lineal con la profundidad del flujo, dada por

$$F_h = 1/2\rho g b h_{max}^2, \quad (2)$$

donde b es el ancho de la estructura y h_{max} a profundidad de la columna de agua, actuando de forma perpendicular a la superficie estructural. Por su parte, la carga hidrodinámica se estima mediante una expresión

$$F_{hd} = 1/2\rho C_d b h u^2, \quad (3)$$

donde C_d es el coeficiente de arrastre, b el ancho de la estructura, h la profundidad de la columna de agua y u la velocidad del flujo a la cual está sometida la estructura. Estas fórmulas se aplican bajo el supuesto de que el flujo actúa normal a la cara de la estructura sumergida a través de la descomposición del vector de velocidad en la dirección normal, y utilizan en geometrías idealizadas para estimar el coeficiente de arrastre.

Si bien ambas normativas han permitido estimar fuerzas de forma conservadora para el diseño de estructuras, comparten una limitación fundamental: simplifican la interacción fluido-estructura considerando solo la componente hidrostática y/o una simplificación de la componente de momentum y la geometría. La metodología que se presenta en este estudio, basada en el TTR, permite estimar la fuerza neta ejercida por el flujo a partir de campos simulados de velocidad y elevación, sin requerir coeficientes empíricos ni supuestos sobre la dirección de con que el flujo impacta la estructura. Esta formulación busca ofrecer una herramienta más robusta y generalizable basándose en la física del fenómeno.

3. MODELO NUMÉRICO DE TSUNAMI

Para las simulaciones numéricas se emplea el modelo Tsunami-HySEA (Castro, 2015), herramienta desarrollada para representar de manera eficiente la propagación y el impacto costero de tsunamis generados por terremotos. Su implementación basada en GPU permite realizar cálculos en tiempos computacionales considerablemente reducidos. Esta capacidad es especialmente útil tanto en contextos operacionales de alerta temprana, como en análisis de múltiples escenarios para evaluación de amenaza y estudios probabilísticos de riesgos.

Tsunami-HySEA resuelve el sistema bidimensional de las ecuaciones de aguas someras cuyo sistema de ecuaciones se presenta a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{q} \otimes \mathbf{q}}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \mathbf{I} \right) = g h \nabla H + \mathbf{S}$$
(4)

Donde $h(\mathbf{x}, t)$ representa la profundidad del agua, $\eta(\mathbf{x}, t)$ la elevación de la superficie libre, y $H(\mathbf{x})$ la batimetría, de modo que $h(\mathbf{x}, t) = \eta(\mathbf{x}, t) + H(\mathbf{x})$. El flujo másico se define como $\mathbf{q}(\mathbf{x}, t) = h(\mathbf{x}, t)\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, siendo $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ el campo de velocidades. Además, \mathbf{I} denota la matriz identidad 2×2 , \mathbf{x} el vector posición y t el tiempo. El término \mathbf{S} representa las pérdidas por fricción, modeladas mediante la formulación de Manning. Estas ecuaciones permiten capturar tanto la propagación del tsunami en mar abierto como su interacción con zonas costeras complejas, incluyendo procesos de run-up e inundación.

La batimetría se obtiene desde una combinación de fuentes globales como GEBCO (<https://www.gebco.net/>) y cartas náuticas (SHOA, 2022) ajustadas con datos locales de alta resolución entorno al área de interés. Por otra parte, el modelo permite el uso de grillas anidadas facilitando una representación detallada en zonas costeras sin comprometer rendimiento computacional. Para este estudio se utilizaron cuatro niveles de grillas, siendo la más detallada aquella centrada en el área de estudio, la cual cuenta con una resolución espacial aproximada de 7 m.

Además, se considera una simulación de tsunami generado por un terremoto de magnitud Mw 9.0 en la zona central de Chile, el cual induce una deformación co-sísmica de 3.24 m. Esto implica que la batimetría original sufre un hundimiento medio de 3.24 m en todo el dominio. En la Figura 1 se presentan las salidas del modelo correspondientes a: (a) a la batimetría deformada $H(\mathbf{x})$ en el dominio posterior al evento sísmico; (b) a la elevación máxima de la superficie libre $\eta(\mathbf{x}, t)$, (c) la magnitud velocidades $\|\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)\|$ para el instante de elevación máxima.

4. METODOLOGÍA

4.1 TEOREMA DE TRANSPORTE DE REYNOLDS

La estimación de fuerzas netas inducidas por un tsunami requiere considerar tanto efectos de la presión hidrostática como aquellos asociados a la cantidad de movimiento del flujo. Para ello, se emplea el TTR, una herramienta fundamental en mecánica de fluidos que permiten describir la evolución de propiedades extensivas –como la masa o el momentum lineal– mediante un balance entre cambios ocurridos dentro de un volumen de control (VC) y los flujos que atraviesan la superficie de control (SC). En términos generales, el TTR se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \phi \rho dV + \int_{SC} \phi \rho \mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n} dS$$
(5)

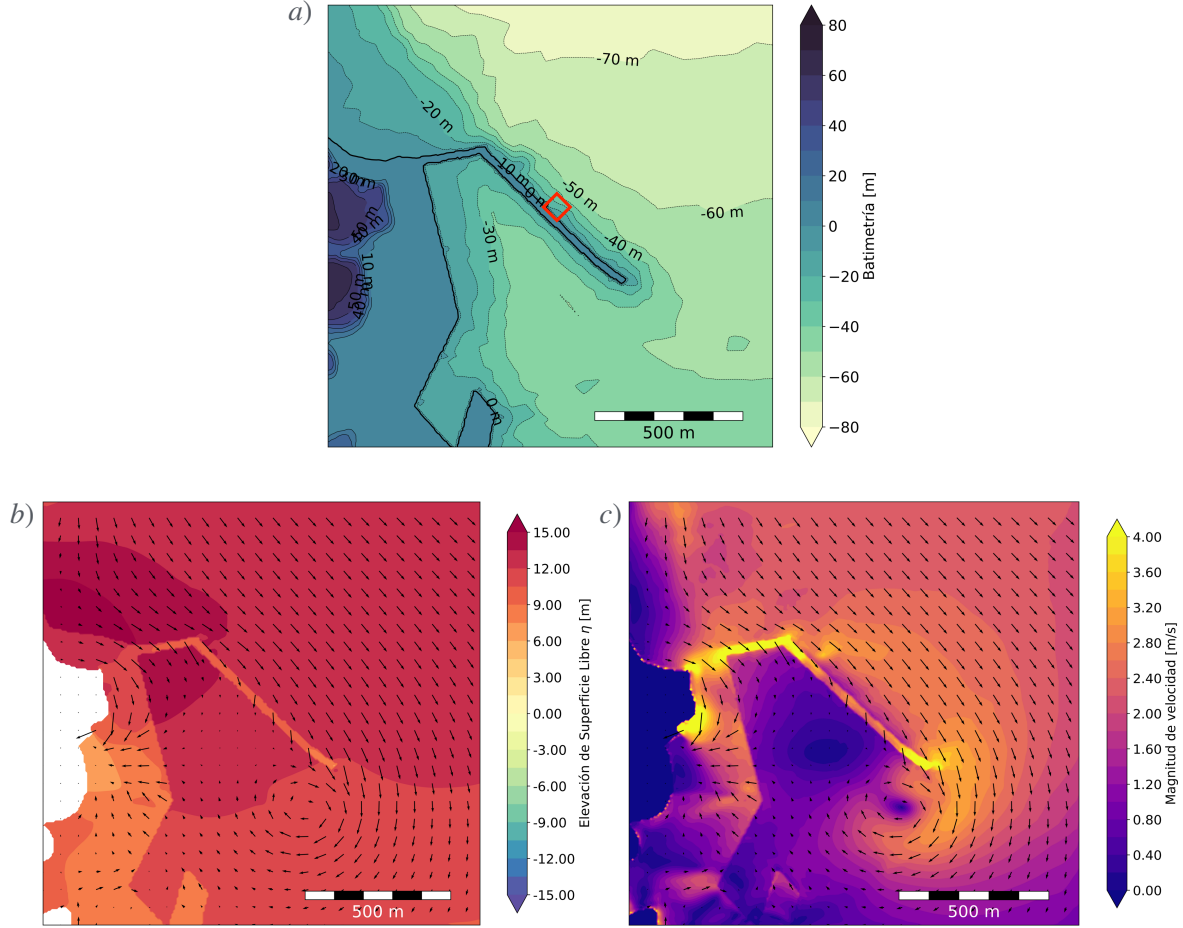


Figura 1: Salidas del modelo Tsunami-HySEA. Panel a) representa la batimetría en la zona de interés y ubicación de volumen de control arbitraria, mientras que paneles b) y c) corresponden a la elevación de superficie libre y magnitud de velocidad sobre el mismo dominio, respectivamente, para el instante de elevación de superficie libre máxima.

donde ϕ es la propiedad intensiva asociada a la propiedad extensiva Φ , \mathbf{v}_r es la velocidad del flujo relativa al volumen de control, \mathbf{n} es el vector normal saliente a la superficie de control y ρ es la densidad del fluido.

En este trabajo, la propiedad extensiva de interés es la cantidad de movimiento, por lo que se considera $\phi = \mathbf{v}$. Bajo esta elección, el TTR permite derivar una formulación para la fuerza hidrodinámica neta ejercida sobre el volumen de control, la cual se compone de (i) la variación temporal del momentum contenido en el volumen de control, (ii) los flujos de momentum que cruzan la superficie de control, y (iii) la presión hidrostática ejercida sobre dicha superficie. La expresión resultante para el balance de fuerzas se escribe como:

$$\sum \mathbf{F}_{ext} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \mathbf{v} dV + \int_{SC} \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS - \int_{SC} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} dS \quad (6)$$

donde $\boldsymbol{\sigma}$ representa el tensor de esfuerzos, que en el contexto de las Ecuaciones de Aguas Someras se asume dominado por el término de presión hidrostática, de modo que: $\boldsymbol{\sigma} = -\rho g h \mathbf{I}$. Esta formulación permite calcular la fuerza neta ejercida por el flujo sobre un

volumen de control arbitrario dentro del dominio simulado, utilizando como entrada los campos de velocidad y altura de agua generados por las simulaciones numéricas de tsunami. El análisis se centra en la estimación de las componentes horizontales de la fuerza neta (F_x, F_y) , incorporando explícitamente las tres contribuciones del balance: el término inercial, el término convectivo y el efecto de presión hidrostática.

4.2 IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

La aplicación del TTR al cálculo de fuerzas hidrodinámicas requiere definir un volumen de control (VC) que encierre el entorno inmediato de la estructura costera. Este volumen se considera fijo en el espacio y arbitrario en su forma, siempre que permita capturar adecuadamente la dinámica local del flujo. En su formulación continua, las integrales en la ecuación (6) se definen sobre un el volumen de control (VC) y su correspondiente superficie de control (SC) que en el dominio bidimensional de las ecuaciones de aguas someras se reducen a una superficie de control delimitada por líneas de control (LC), respectivamente. De este modo, la fuerza hidrodinámica neta de la ecuación (6) se expresan como la suma de tres contribuciones principales, las cuales se exponen en la ecuación (7):

- (i) Variación temporal del momentum dentro de SC, calculada como la diferencia del flujo másico $\mathbf{q} = (q_x, q_y) = (hu, hv)$ entre dos instantes sucesivos, en cada componente direccional $k \in \{x, y\}$, correspondiente a las coordenadas globales de la grilla numérica;
- (ii) Flujos convectivos de momentum a través de cada segmento de LC, proyectados según la normal $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ y multiplicado por la longitud de la línea de control $||L_s||$;
- (iii) Fuerza de presión hidrostática, evaluada también sobre cada segmento de LC y proyectadas normal a los bordes donde fue calculada.

La profundidad (h) y la velocidad (\mathbf{u}) del flujo se obtienen desde las simulaciones hidrodinámicas. A partir de estas, se calcula el flujo másico (\mathbf{q}) sobre la superficie de control definida en el área de interés. La elección de esta determina únicamente de la ubicación de la superficie de control y, por tanto, que celdas de borde del modelo participan en el cálculo. Esta relación se expresa con la notación $(\cdot)_s$, que indica que integrales de flujo se calculan de forma puntual en cada segmento s que encierra la superficie de control proyectada sobre la grilla numérica.

$$\begin{aligned}
 \text{(i)} \quad & \frac{1}{\Delta t} \sum_{VC} q_k(t + \Delta t) - q_k(t); \quad k \in \{x, y\} \\
 \text{(ii)} \quad & \sum_{s \in L} \left(\sum_k \left(\sum_m \frac{q_k q_m}{h} \right) n_k \right)_s ||L_s|| \quad k \in \{x, y\} \\
 \text{(iii)} \quad & \sum_{s \in L} \left(\sum_k \frac{1}{2} g h^2 n_k \right)_s ||L_s||; \quad k \in \{x, y\}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Este procedimiento se automatiza a partir de las salidas del modelo hidrodinámico, extrayendo en cada instante de simulación las variables requeridas. La Figura 2 ilustra los resultados obtenidos al aplicar un volumen de control arbitrario. El panel a) representa la ubicación de SC respecto al Molo del Puerto de Valparaíso (cuadrado rojo en Figura 1), junto con las normales a cada cara del contorno, definidas como \hat{n}_i y l_i , respectivamente. El panel b) presenta la evolución temporal de la elevación de superficie libre y el panel c) la magnitud de la velocidad en el centro de la superficie de control (SC). Finalmente, los paneles d) y e) muestran la magnitud de la fuerza y el ángulo de la fuerza, donde -90° representa la dirección normal a la estructura.

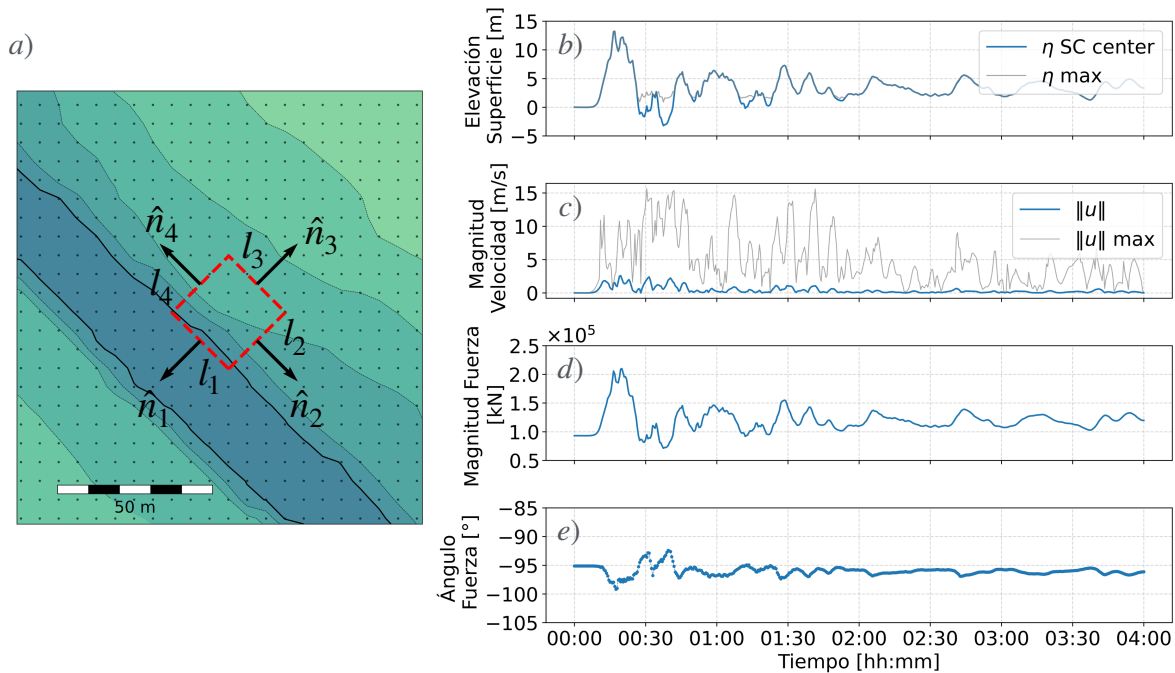


Figura 2: Implementación sobre volumen de control arbitrario en lado offshore de la estructura a considerar.

Esta metodología permite estimar las fuerzas hidrodinámicas sobre geometrías arbitrarias, sin restricciones de forma o tamaño. Además, es independiente del software de modelación utilizado y solo requiere como datos de entrada la altura del flujo y el campo de velocidades, por lo que puede aplicarse con facilidad a cualquier modelo numérico que resuelva las NLSWE, sin necesidad de modificaciones sustanciales.

4.3 DEFINICIÓN DE SUPERFICIE DE CONTROL Y ADAPTACIÓN DE NORMATIVAS

El tamaño de la superficie de control está determinado por la resolución espacial del modelo numérico, la cual es del orden de ~ 7 m en el sector de interés. Un análisis de sensibilidad del tamaño y escalas de la superficie de control (largos de 25, 50, 100 y 200 m y escalas 1:1, 1:2, 1:4 y 1:8) permitió verificar que la fuerza, por ejemplo, en una superficie de control de escala 1:4 es equivalente a la suma de las fuerzas de cuatro superficies de escala 1:1 que cubren la misma área. Esto demostró que la fuerza resultante es independiente del tamaño de la superficie, por lo que se optó por una superficie de control que abarca cinco celdas de la grilla

en cada dirección, equivalente a un área cuadrada de ~28 m de lado. La fuerza resultante neta estimada se considera uniformemente distribuida a lo largo del segmento de estructura contenido dentro de la SC (~28 m). No obstante, se mantiene la naturaleza de cada componente: la fuerza hidrostática se distribuye linealmente con la profundidad, mientras que las componentes asociadas a momentum se asumen uniformes en la vertical, siendo consistentes con el perfil de velocidad obtenida de las ecuaciones de aguas someras.

Para efectos de comparación, la metodología propuesta y las normativas MLIT (2020) y ASCE/SEI (2016), se aplican sobre el mismo dominio espacial definido por la superficie de control. Esto significa que se utilizan los mismos campos de batimetría, elevación de la superficie libre y velocidad del flujo, según lo requerido por cada formulación. Cabe destacar que esta implementación no busca estimar la fuerza puntual ejercida al pie de la estructura, sino la fuerza resultante sobre el área encerrada por la superficie de control, con el único propósito de facilitar una comparación de magnitudes entre métodos.

5. RESULTADOS

5.1 FUERZAS ESTIMADAS MEDIANTE TTR

Para evaluar la metodología propuesta, se disponen 33 superficie de control (SC) de forma cuadrada y de 28 m de lado, distribuidas a lo largo del borde expuesto del molo de abrigo del puerto de Valparaíso. La Figura 3a muestra la disposición espacial de las SC a través de una escala de colores en cada uno de los cuales se estiman las componentes ortogonales de la fuerza neta (F_x, F_y) o, alternativamente, su magnitud de fuerza y dirección. La Figura 3b presenta la magnitud de la fuerza neta resultante en cada SC. Además, se incluyen la descomposición de la fuerza neta en presión hidrostática (Figura 3c), flujos de momentum (Figura 3d) y variación temporal del momentum (Figura 3e). La línea vertical negra en cada gráfico indica el instante en que se alcanza la elevación máxima de la superficie, correspondiente al momento destacado en la Figura 1.

La distribución espacial revela que superficies de control ubicadas en el brazo de arranque del molo experimentan fuerzas netas menores debido a que se encuentran en una zona de menor profundidad que las superficies de control a lo largo del brazo principal. Por otra parte, y dada la gran profundidad de la estructura, la presión hidrostática es la principal contribución a la fuerza total durante el instante de máxima elevación (Figura 3c). No obstante, las contribuciones del flujo de momentum y la variación temporal del momentum pueden ser cercanas al 20% de la fuerza neta, especialmente en algunas SC donde se concentran mayores velocidades. Estos casos se localizan principalmente en el arranque del molo, en la unión entre ambos brazos y en el extremo del brazo principal, lo cual concuerda con el campo de velocidades mostrado en la Figura 1.

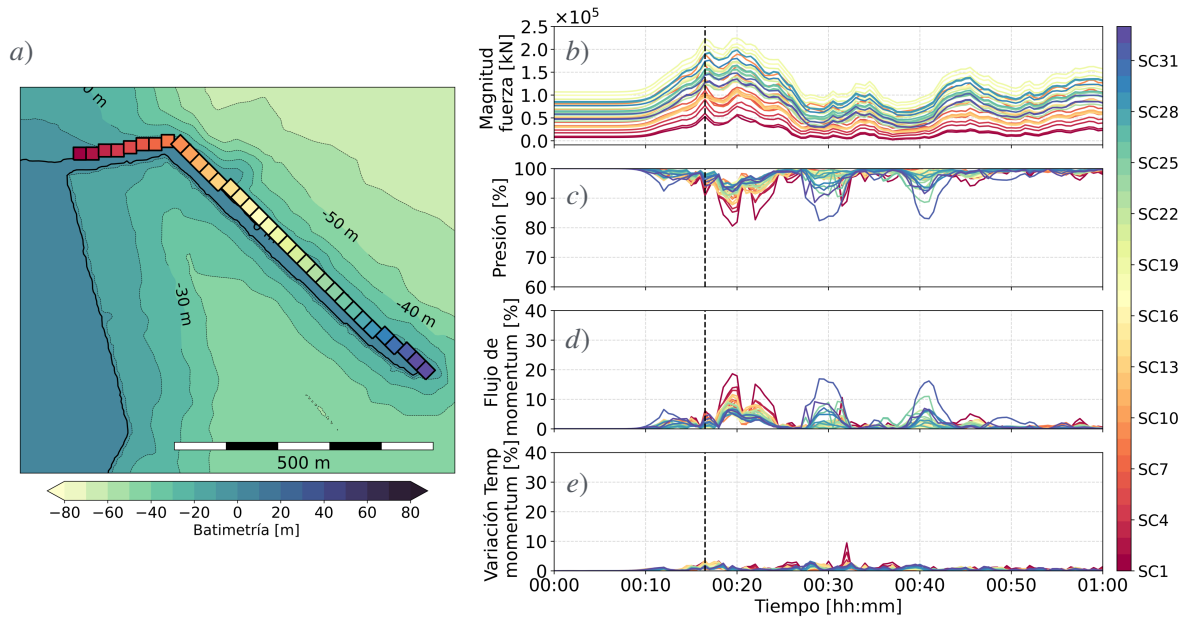


Figura 3: Variación espacial de SC entorno a la estructura. Panel a) muestra ubicación de VC, mientras que panel b) representa la magnitud de fuerza total resultante. Paneles c)-e) corresponden al porcentaje de contribución de cada componente sobre fuerza total.

5.2 COMPARACIÓN CON NORMATIVAS

La comparación de fuerzas netas estimadas mediante la metodología propuesta y las normativas MLIT y ASCE/SEI, evaluadas en el instante en que la elevación de la superficie libre es máxima (conforme al criterio de dichas normativas), se presenta en la Figura 4. La escala de colores empleada en los paneles a) y b) es consistente con la utilizada en la Figura 3, permitiendo identificar cada superficie de control según su disposición espacial.

En general, se observa que las fuerzas estimadas por los tres métodos se encuentran en un mismo orden de magnitud para todas las superficies de control, lo que se atribuye a que la componente hidrostática es la dominante a lo largo del molo en todas las superficies de control analizadas. No obstante, la diferencia porcentual relativa entre las fuerzas calculadas mediante el TTR y las estimadas por cada normativa, es significativa. En el caso del estándar MLIT, las variaciones oscilan entre -8% (subestimación del TTR) y +12% (sobrestimación), dependiendo de la ubicación de la superficie de control. En contraste, las diferencias respecto a la norma ASCE son consistentemente positivos, lo que indica que la estimación de la fuerza por parte del TTR es mayor que la del ASCE.

Aunque la norma ASCE incorpora efectos hidrodinámicos mediante el uso de un coeficiente de arrastre, la contribución de esta componente es relativamente menor en comparación a la componente hidrostática. Esta discrepancia se explica en el hecho de que ASCE considera que un flujo perpendicular a la estructura, lo cual requiere proyectar la velocidad de dicha dirección, reduciendo la magnitud de la velocidad efectiva y, por ende, la componente hidrodinámica de la fuerza.

Finalmente, la metodología MLIT considera factores de amplificación y reducción en función de la orientación del tsunami respecto a la estructura, lo que mejora la correlación

con la fuerza estimada mediante el TTR (lo que no ocurre con la formulación propuesta por la ASCE). La correlación entre ambas normativas y la metodología TTR se presenta en la Figura 4c.

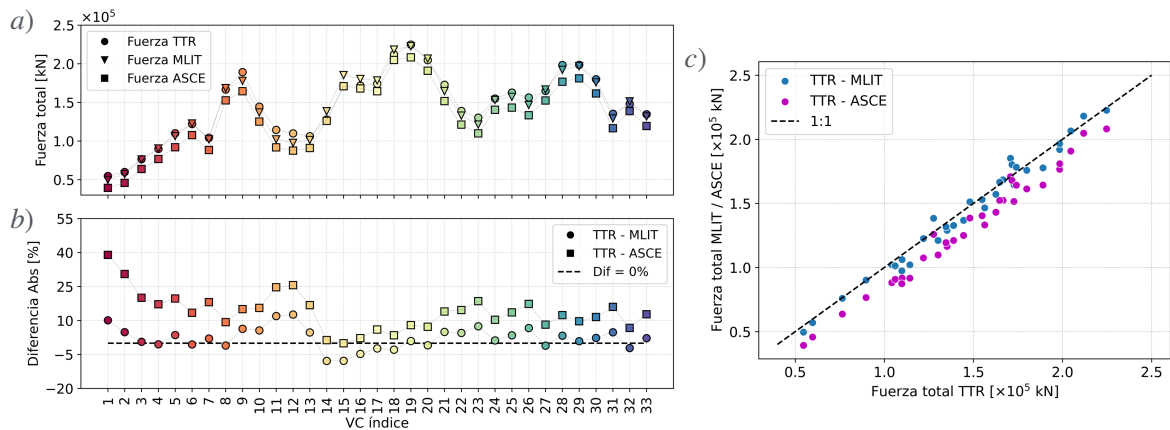


Figura 4: Resultados de fuerza total para normativa MLIT y ASCE y su comparativa con metodología propuesta. Panel a) muestra fuerza total por cada volumen de control, mientras que panel b) muestra la variación absoluta entre TTR y cada normativa. Panel c) gráfico de dispersión de fuerza total estimada.

6. DISCUSIÓN

La metodología basada en el TTR permite estimar la fuerza neta ejercida sobre una superficie de control arbitraria a partir de los campos de batimetría deformada, elevación de la superficie libre y velocidad del flujo. La metodología permite separar las contribuciones de presión hidrostática, flujo de momentum y variación temporal del momentum, que no se incluyen en otras recomendaciones.

La comparación con el estándar MLIT (2020) muestra una buena correlación en magnitud y distribución espacial de la fuerza neta, lo que se explica en que dicha normativa incorpora factores de amplificación y reducción según la orientación relativa del tsunami respecto a la estructura.

Por el contrario, la comparación con la norma ASCE evidencia diferencias atribuibles a la simplificación en la formulación hidrodinámica y ausencia de coeficientes de amplificación y/o reducción. Esta norma estima la fuerza de arrastre asumiendo un flujo perpendicular a la estructura, lo que exige proyectar la velocidad en dicha dirección. Como consecuencia, la magnitud de la fuerza hidrodinámica se reduce significativamente cuando la velocidad no es perpendicular al plano de la estructura. Por otro lado, el uso de un coeficiente de arrastre no es adecuado para estructuras cuya dimensión altera significativamente el flujo, como es el caso de estudio.

Pese a estas diferencias, los resultados obtenidos muestran que la metodología basada en el TTR permite estimar con mayor exactitud la fuerza neta total, sin recurrir a coeficientes empíricos ni factores de corrección específicos del caso de estudio. Cabe destacar que se no dispone de una medición directa de la fuerza ejercida del flujo; sin embargo, como validación futura, se propone comparar la fuerza neta estimada con TTR con la integral de los términos

fuerza de batimetría y fricción de las NLSWE. Esta verificación de balance garantizaría la consistencia entre ambas formulaciones y reforzaría la robustez y coherencia física del método, consolidando su validez y aplicabilidad a diversos escenarios de tsunamis y configuraciones del volumen de control.

Finalmente, el método propuesto es independiente del modelo numérico empleado para simular el tsunami, así como también de la superficie de control definida. Estas características hacen que la herramienta sea aplicable en entornos costeros y portuarios diversos. En este sentido, la metodología propuesta puede contribuir al desarrollo de criterios de diseños más robustos y específicos para estructuras expuestas a tsunamis.

7. CONCLUSIÓN

Este trabajo presenta una metodología para la estimación de fuerzas inducidas por tsunamis sobre estructuras costeras, basadas en el TTR y apoyada en simulaciones numéricas de un evento de magnitud Mw 9.0 frente a las costas de Valparaíso. La metodología utiliza como insumo los campos de batimetría, elevación de superficie libre y velocidad de flujo provenientes de simulaciones numéricas, generados sobre una grilla de 7 m de resolución en el entorno inmediato del molo de abrigo.

La estimación de la fuerza neta se descompone en tres componentes físicas: presión hidrostática, flujo de momentum y variación temporal del momentum, evaluadas sobre un determinada superficie de control. La metodología es comparada con el estándar MLIT (2020) y la norma estadounidense ASCE/SEI (2016). Los resultados muestran una buena correlación con la primera, atribuida en parte a la incorporación de factores de corrección. En contraste, se observan diferencias más significativas con la norma ASCE, debido a los supuestos empleados para incluir los efectos hidrodinámicos mediante coeficientes de arrastre.

Se destaca como principal ventaja que la metodología propuesta es independiente de la superficie de control y del modelo numérico utilizado, lo que permite su aplicación flexible en distintos contextos geométricos y escenarios de propagación. Asimismo, al estar basada en principios físicos y no depender de factores empíricos o coeficientes de corrección, ofrece una herramienta robusta para la estimación directa de fuerzas netas en problemas de interacción fluido-estructura inducidos por tsunamis.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) a través del Centro para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN), ANID/FONDAP 2023 / 1523A0009.

REFERENCIAS

- Fritz, H. P.-B. (2011). Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, pp.1989-2010.
- Arikawa, T. S. (2012). Failure mechanism of Kamaishi breakwaters due to the Great East Japan earthquake tsunami. *Coastal Engineering*, 1-13.
- Yeh, H. a. (2016). Tsunami effects on buildings and coastal structures. *Journal of Disaster Research*, 662-669.
- Nistor, I. P. (2018). Tsunami-induced forces on structures. *Handbook of coastal and ocean engineering*, 481-506.
- Yeh, H. B. (2014). Tsunami loadings on structures: Review and analysis. *Coastal Engineering Proceedings*.
- Berger, M. (2011). TheGeoClawsoftwarefordepth-averagedflowswithadaptiverefinement. *Advances in Water Resources*, 1195–1206.
- Castro, M. G.-V. (2015). Tsunami-HySEA: a GPU-based model for tsunami early warning systems. *In Proceedings of the XXIV Congress on Differential Equations and Applications. XIV Congress on Applied Mathematics.*, 1-6.
- MLIT. (2020). Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan.
- ASCE/SEI. (2022). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
- ASCE/SEI. (2016). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.
- SHOA. (2022). Carta Náutica SHOA N° 5111 - Bahía y Puerto de Valparaíso .