

IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

Evaluación e implementación de una metodología simplificada de inundación por tsunami basada en el método de energía propuesto en la ASCE 7-16

María Fernanda Estrada Carrasco Alejandro Urrutia Rodrigo Cienfuegos Carrasco

1. **RESUMEN**

La modelación de eventos de tsunami actualmente es sumamente costosa computacionalmente. Por esto este trabajo tiene por objetivo evaluar e implementar un modelo matemático simplificado para la elaboración de mapas de inundación por tsunami en la costa chilena.

En este trabajo se modifica el modelo basado en la ecuación de energía propuesto por la ASCE 7-16, donde es posible estimar las profundidades de inundación de un tsunami en un perfil si se conoce la cota máxima de inundación en el perfil (ASCE, 2013). El modelo se modifica de manera de operar sin conocer a priori la línea de inundación máxima, sino una estimación de la altura de ola de tsunami al inicio de la zona de inundación (niveles cero del mar antes del arribo del tsunami). Las modificaciones propuestas se validan primero comparando con algunos casos de estudio usados para validar el método por Kriebel et al. (2017). Luego se evaluó la implementación del método utilizando como caso de estudio la ciudad de Viña del Mar, en las cercanías de la desembocadura del estero Marga Marga. Se realizaron comparaciones de los resultados del método con simulaciones de tsunamis completas realizadas con el modelo GeoClaw (Berger et al., 2011), el cual resuelve las ecuaciones no-lineales de aguas someras.

A partir de los resultados de esta comparación, es posible cuantificar los errores del modelo en distintos tipos de perfiles. Se concluye que le método de la energía puede entregar resultados consistentes y podría ser de utilidad para el desarrollo de mapas de inundación probabilístico de tsunamis.



2. INTRODUCCIÓN

Actualmente el peligro de tsunamis en las costas Chile se estudia principalmente a partir de modelación hidrodinámica en dos dimensiones basada en las ecuaciones no lineales de aguas someras. Estos modelos si bien presentan resultados precisos implican un alto costo computacional, especialmente para aplicaciones probabilísticas que requieren decenas de miles de simulaciones. Es por este motivo que en este trabajo se presenta una evaluación de una metodología simplificada para obtener las profundidades y distancias de inundación en zonas costeras.

El colegio de ingenieros de la American Society of Civil Engineers (ASCE, 2013) ha propuesto el método de energía para estimar las profundidades de inundación en un perfil topo batimétrico. Este enfoque se basa en un modelo unidimensional de conservación de energía que recrea el comportamiento de inundación sobre un perfil.

En este trabajo se evaluará el funcionamiento de este método comparando sus resultados con simulaciones completas de inundación de tsunami en la bahía de Viña del Mar.

3. METODOLOGÍA

3.1. MÉTODO DE ENERGÍA

El método de la ASCE consiste en estimar la línea de energía del tsunami desde el océano hacia la zona de inundación a partir de las siguientes ecuaciones:

(1)

$$E_{i+1} = E_i - (m_i + S_i) \Delta x_i$$

$$z_{i+1} + h_{i+1} + \frac{u_{i+1}^2}{2g} = z_{i+1} + h_{i+1} + \frac{u_{i+1}^2}{2g} - S_i \Delta x_i$$
⁽²⁾

$$S_{i} = \frac{u_{i}^{2}}{\left(\frac{k}{n_{i}}\right)^{2} h_{i}^{\frac{4}{3}}}$$
(3)

Donde E_i es la energía en el punto i, z es la cota del terreno, h la profundidad de inundación, u es la velocidad de la ola y g es la aceleración de gravedad. El término m_i corresponde a la pendiente local del terreno, S_i es la pendiente de fricción local y Δx_i la discretización horizontal del terreno. En la Figura 1 es posible visualizar gráficamente las componentes de la ecuación (1), (2) y (3).



Figura 1: Ilustración del método de energía a través de un perfil inundado. Energy Grade Line H_{L} U²/2g S: Ax Water leve Incident E E_{i+1} Energy = E_o h h. Mapped $m_i \Delta x$ Runup Δx R X X_{i+1} Sea Level Mapped Inundation Distance X_r Fuente: Kriebel et al. (2017)

A partir de las ecuaciones (2) y (3), Kriebel et al. (2017) plantea la ecuación (4) la cual será la base para la realización de este estudio. En esta ecuación se tiene que el término de velocidad, propio de la conservación de energía, es reemplazado por una relación con el número adimensional de Froude presente en la ecuación (5). La pérdida de energía se representa finalmente en función del coeficiente de Manning del terreno (n), la altura de inundación y el número de Froude en un tramo Δx .

$$\left(z+h+\frac{1}{2}F^{2}h\right)_{i+1} = \left(z+h+\frac{1}{2}F^{2}h\right)_{i} - \left(\frac{gF^{2}\Delta x}{\left(\frac{1}{n}\right)^{2}h^{\frac{1}{3}}}\right)_{i}$$
(4)
$$F = \frac{u_{i}}{\sqrt{gh_{i}}}$$
(5)

Kriebel et al. (2017) proponen una función empírica para la variación del número de Froude en la zona de inundación respaldada por experimentos de laboratorio. Este número se puede relacionar directamente con la distancia desde el inicio de la inundación. En la literatura se encontraron dos propuestas de parametrización para el número de Froude, la primera y más utilizada es la siguiente (ASCE, 2013):

$$F = F_0 \left(1 - \frac{x}{x_R} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

donde el término F_0 representa el número de Froude a la entrada de la zona de inundación (x = 0) y x_R corresponde a la distancia horizontal máxima de inundación.

La segunda fórmula, presentada por Wiebe et al. (2013), también presenta un decaimiento del número de Froude en función de *x*, pero de forma lineal a partir de la ecuación:

$$F = F_0 + (c - F_0) \left(\frac{x}{x_R}\right) \tag{7}$$



donde se plantea que el valor de F_0 depende del coeficiente de Manning de la zona y existe el término c que también depende de la topografía del terreno, específicamente de las pendientes existentes.

Las variaciones leves del valor de F_0 no generan diferencias significativas en los resultados según Kriebel et al. (2017), el cual presenta un rango de valores entre 0.85 y 1 que entregan resultados similares. Por otro lado, Wiebe et al. (2013) propone un rango de valores posibles de Froude entre 0.8 y 3, el cual se define por el coeficiente de rugosidad del terreno. Dependiendo de las características de la zona y las comparaciones con simulaciones en dos dimensiones se debe elegir el valor de F_0 que mejor se ajuste a la costa de estudio.

A lo largo de este trabajo llamaremos Forma 1 del método cuando el valor del número de Froude se determina con la ecuación (5) y Forma 2 cuando se haga con la ecuación (6). Wiebe et al. (2013) menciona que cuando los perfiles presentan pendientes suaves (m < 1/500) es mejor utilizar la ecuación (5), mientras que para pendientes fuertes (m > 1/500) el decaimiento líneas de la ecuación (6) representa mejor el comportamiento en el terreno. Por lo tanto, se espera que para pendientes suaves la Forma 1 entregue mejores resultados que la Forma 2 y en pendientes fuerte que la Forma 2 presente mejores resultados.

3.2. MODIFICACIÓN DEL MÉTODO DE ENERGÍA

El método de energía presentado considera conocida la altura del *run-up* y ubicación de la inundación en el terreno, para luego estimar las profundidades de inundación en el perfil. Sin embargo, es posible modificar el método para estimar la inundación a partir de un valor de altura de tsunami aguas afuera. Para ello, se deben realizar ajustes de manera de utilizar el método de energía en la estimación de inundación, *run-up* y distancias horizontal máxima de inundación. Para esto se utilizará un método iterativo que recibe como parámetros de entrada la altura de ola aguas afuera de la costa, la topo batimetría de un perfil y el coeficiente de Manning que caracteriza las condiciones de rugosidad del terreno.

Dado que no se tiene conocimiento de x_R no es posible utilizar las ecuaciones (5) y (6) para caracterizar el comportamiento del número de Froude, se proponen 3 formas de caracterizar la evolución del número de Froude en la zona de inundación, como se presenta a continuación (Castro, 2022):

- Caso 1:
$$F = 1$$
 (7)

- Caso 2:
$$F = \begin{cases} 1 - \frac{x}{50}, \ x \le 50 \\ 0, \ x > 50 \end{cases}$$
 (8)

- Caso 3:
$$F = \begin{cases} 1 - \frac{x}{2000}, \ x \le 2000\\ 0, \ x > 2000 \end{cases}$$
 (9)

La metodología propuesta parte con tres proyecciones de la distancia de inundación, una por cada caso de Froude posible, a partir de la ecuación (3) del método de energía, teniendo como dato de entrada la amplitud de la ola aguas afuera. Nos referiremos a altura de ola aguas afuera a la altura de ola por sobre el nivel medio del mar que se ubica al inicio de la costa (cuando la



distancia de inundación es cero). A modo de ejemplo en la Figura 2, se tiene que la altura de ola aguas afuera en la posición 0 es de 7.7 m.

A partir de la primera iteración se tendrán tres valores de x_R , con los cuales se volverán a realizar tres iteraciones del método de energía, pero ahora utilizando la ecuación (5) o (6) según sea el caso. Este proceso de obtención de distancias de inundación e iteración de este valor se debe repetir hasta que los valores obtenidos en las tres proyecciones sean iguales o hasta que se encuentre un patrón donde se repitan las distancias de inundación. La Figura 3, presenta en función de resultados el esquema del método.





Figura 3: Representación del método iterativo en función del perfil lineal.



Fuente: Castro. (2022).



3.3. VALIDACIÓN MODELO

De forma de validar la modelo iterativa propuesta se utilizaron los perfiles topográficos de la región de Monterey, California presentes en el estudio realizado por Kriebel et al. (2017). Estos fueron obtenidos a partir de la utilización el programa Digitizelt, el cual permite obtener los valores de coordenadas a partir de imágenes de gráficos.

El estudio de Kriebel et al. (2017) entrega el perfil de ola estimado a partir del método de energía, donde es conocida en cada uno de los perfiles la distancia de inundación y *run up*. Se utilizarán en específico los *Transect* 2, 3, 7 y 8, a partir de una discretización de 5 metros y un coeficiente de Manning de 0.025.

3.4. EVALUACIÓN DEL MODELO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

Se implementó el modelo modificado antes descrito para estimar la altura de *run-up* y la distancia de inundación frente a distintas amplitudes de tsunamis. Se eligió la ciudad de Viña del Mar para realizar el estudio. Para utilizar el método lo primero que se realizó fue trazar un perfil transversal en la zona costera. La ubicación del perfil está presente en la Figura 6 y la Figura 7 presenta las elevaciones del perfil con respecto al nivel del mar.







Figura 7: Perfil transversal de estudio.



Existen dos parámetros necesarios de calibrar en el modelo, el coeficiente de rugosidad de Manning y el valor del número de Froude en la costa. El valor del coeficiente de Manning que se utilizará en este caso es de 0.04 y un valor de partida para número de Froude en la costa (F_0) de 0.8. En el caso de utilizar la ecuación (6) para modelar la evolución del número de Froude en la zona de inundación se considera que c es igual a 0.5, este valor representa una visión conservadora del método de energía al evitar que la velocidad y cantidad de movimiento sean cero en el punto de inundación final (Wiebe et al, 2013).

El esquema iterativo de la metodología se implementó tanto para la Forma 1 como la Forma 2, obteniendo así dos pares de valores de distancia de inundación y *run-up*. Para esta iteración se consideró un $\Delta x = 1$ m, cada vez que se calcule la distancia de inundación y el run-up en la iteración.

Se analizaron 1800 escenarios de altura de ola afuera de la costa, para cada uno de estos escenarios se obtuvo el perfil de la altura de ola, la línea de energía y la evolución del número de Froude para cada perfil. La distancia horizontal máxima de inundación y run up obtenido, se comparan con las simulaciones realizadas en 2D con el modelo GEOCLAW (Berger et al., 2011) para los mismos escenarios de altura de ola afuera de la costa. Las simulaciones consisten en una malla de 4637 columnas y 3086 filas, la cual presenta un tamaño de celda de 4.4 m de ancho y largo. Donde se utiliza una variación de tiempo de 1 segundo.

Para calcular el error entre los resultados del método lineal y las simulaciones en dos dimensiones se utilizó la siguiente ecuación:

$$error = resultado_{modelo} - resultado_{simulación 2D}$$
(10)

Para analizar el error se construye un procedimiento de dos pasos, teniendo en cuenta los 1800 escenarios entregados de la simulación 2D. Los pasos son los siguientes:

- Paso 1: Calcular los histogramas de frecuencia e histogramas normalizados de los errores en función de los resultados obtenidos con el modelo GEOCLAW (Berger et al., 2011). Lo



que se busca con esto es determinar si los errores distribuyen o no de forma gaussiana, esto se logra fácilmente obteniendo la curva de densidad del histograma normalizado de los errores.

Paso 2: Es necesario entender por qué se generan grandes diferencias en los resultados, para esto se crearon distintos gráficos de dispersión; inundación v/s altura de ola, run-up v/s altura de ola, error inundación v/s altura de ola, error de run-up v/s altura de ola, error inundación v/s pendiente y error de run-up v/s pendiente. Junto con los gráficos se realizó un zoom a la topografía del perfil en la cual se generan las inundaciones, de modo de entender cómo influye el terreno en los resultados.

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADO VALIDACIÓN MODELO

Se realizó el proceso iterativo utilizando las alturas de olas presentes en el documento de Kriebel et al. (2017) y se comparó el resultado obtenido de la inundación con la inundación real ocurrida en esa zona y se obtuvieron resultados bastante similares. En la Tabla1, se presentan los resultados obtenidos en comparación con los valores originales en cada uno de los perfiles utilizados. Estos resultados al presentar un error menor al 1% de error, permiten validar la implementación correcta de los códigos en Python.

Nombre del	Valor inundación	Valor Inundación Error (%)	
perfil	real (m)	simulada (m)	
Transect 2	520	515	-0.96 %
Transect 3	770	765	-0.65 %
Transect 7	1010	1015	0.5 %
Transect 8	460	460	0%

	Tabla 7.1: Compare	ación de resultados	simulados y la c	distancia de inu	ndación real.
--	--------------------	---------------------	------------------	------------------	---------------

En la Figura 8 a modo de ejemplo se presenta la primera iteración del método iterativo y en la Figura 9 el perfil final que se obtiene. Este se asemeja bastante a los resultados estimados por la ASCE.





Figura 9: Comportamiento de ola en el Transcet 3.



4.2. RESULTADO EVALUACIÓN DEL MODELO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

En la Figura 10, se presentan diferencias en la distancia horizontal máxima de inundación y *run-up* de los resultados obtenidos mediante la Forma 1 y 2 a partir de 1800 escenarios de amplitud de ola distinto modelados en 2D usando el modelo GEOCLAW (Berger et al., 2011). Se observó que la Forma 1 tiende a sobreestimar en mayor medida la distancia horizontal máxima de inundación que la Forma 2, como se observa en la Figura 10, pero ambas tienen un comportamiento similar en la cota de run-up. Como el terreno tiene cambios de pendiente bruscos a lo largos de un perfil, no es posible utilizar la relación de Wiebe et al. (2013) para determinar mejor forma a utilizar, por lo que se debe hacer un análisis de errores para cada perfil que se desee estudiar.

A partir de los resultados de distancia horizontal máxima de inundación y *run-up* obtenidos por la metodología propuesta, se prosiguió a analizar el comportamiento de los errores entre el método simplificado y el modelo GEOCLAW (Berger et al., 2011). En la Figura 11 es posible observar el comportamiento de los errores normalizados de inundación y *run-up* para las Formas 1 y 2. Los errores de distancia horizontal máxima de inundación se encuentran centrados cercanos al error 0 m. Visualmente la Forma 2 si bien presenta mayores errores de subestimación, se ajusta mejor a una distribución gaussiana que la Forma 1, ya que esta última presenta dos máximos locales y no se encuentra centrada en 0 m. Si se analiza el comportamiento de los errores de *run-up* de ambas



formas, las dos podrían ser ajustadas a una gaussiana si se eliminan los errores inferiores a -10 m, pero se preferiría la Forma 2 dado que presenta un mejor ajuste al presentar una mayor probabilidad de tener errores cercanos a 0 m.





Figura 11: Errores normalizadas de inundación y run up en el perfil de estudio.



Para complementar el análisis del comportamiento de los errores, en la Figura 12, se presentan diagramas para analizar cómo se comporta el error de distancia horizontal máxima de inundación en el perfil. Del esquema es posible entender que cuando el terreno presenta pendientes positivas menores a 0.1 el método iterativo (ver Figura 10.d y 10.e) tiende a subestimar la distancia de inundación. En este perfil se tiene aproximadamente 300 metros de pendientes menores a 0.1, lo cual es consistente con la amplitud del error generado al utilizar el método de Forma 1, mientras que para la Forma 2 se tiene una amplitud del error de 200 metros.

De la Figura 13, se desprende que el modelo sobreestima la altura del *run-up* cuando la pendiente del terreno en el punto de inundación horizontal máxima presenta pendiente fuerte (m > 0.1). Esto se debe a que variaciones en la distancia de inundación afectan significativamente a las variaciones de altura. Se tiene, además que a mayor altura de ola es más probable que el perfil



de la ola intercepte con el terreno con pendiente fuerte dada la topografía de la zona de estudio. En estos casos, nuevamente los resultados son mejores en general con la Forma 2.

Dado el análisis del error de inundación y *run-up*, se tiene que forma a utilizar en el modelo iterativo es la Forma 2. Porque presenta un mejor ajuste de errores de *run-up*, presenta un ajuste de errores de distancia horizontal máxima de inundación centrado en 0m y, además, es posible observar de la Figura 12.c que la Forma 2 un mejor ajuste de valores de inundación que la Forma 1.



Figura 12: Esquema de análisis del error de inundación del perfil.





Figura 13: Esquema de análisis del error de *run-up* del perfil.

A partir de un nuevo set de 4018 escenarios de alturas máximas de ola en la comuna de Viña del Mar, se realizó el proceso descrito anteriormente y un análisis de los errores detectados. La particularidad de estos escenarios es que comprendían alturas de olas generadas por eventos de tsunamis de baja intensidad, en su mayoría con alturas de ola entre 1 a 3 metros.

De los resultados se tiene que, para la altura más pequeña, los errores relativos tienden a ser mayores. Esto se debe a que las simulaciones en dos dimensiones consideran características físicas que el modelo simplificado no puede reproducir, como por ejemplo el hundimiento del terreno en la costa y el rompimiento de las olas de tsunami. Para entender este fenómeno, en la Figura 14 se presenta los resultados de *run-up* v/s altura de ola del perfil anteriormente analizado, pero considerando los nuevos 4018 escenarios. Es posible observar que la altura de *run-up* modelado en GEOCLAW para una altura de ola en la costa menor a 2 metros presenta una elevación mayor que la altura de *run-up* generada por el modelo simplificado. Una posible respuesta a las diferencias de *run-up* para alturas de ola pequeñas es la cuantificación de la velocidad, el modelo lineal considera la velocidad en función de las alturas, mientras que el modelo en dos dimensiones considera un valor de velocidad independiente de la altura, generando diferencias en los resultados de *run-up*.



Figura 14: Comparación resultados de *run-up* en función de la altura de ola en la costa del perfil, para 4018 escenarios.



De los 4018 escenarios evaluados, se comprueba que el modelo captura el comportamiento de las profundidades de inundación de tsunamis en el perfil de estudio de manera consistente a pesar de no considerar todos los fenómenos físicos involucrados ni los fenómenos 2D. Es necesario realizar un análisis de los intervalos de confianza de los resultados del modelo simplificado para ver si es posible encontrar un valor que permita caracterizar el error en el perfil y así tener una recomendación de las características topográficas de los perfiles a utilizar a partir de los grupos de perfiles anteriormente definidos.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo entregan elementos que posibilitarían la utilización de la metodología ASCE 7-16 modificada en la ciudad de Viña del Mar para analizar el comportamiento de la inundación de tsunami por cuanto se ha mostrado que entrega estimaciones consistentes con modelos computacionales más sofisticados. Si bien el método no contiene información de fenómenos en dos dimensiones, para olas mayores a 2 metros se obtiene un comportamiento de ola similar al de un modelo no lineal de aguas someras en dos dimensiones. Este resultado es relevante ya que permite la continuación del estudio y la posible implementación del método en diferentes costas chilenas.

Los pasos a seguir son analizar el comportamiento del modelo en las ciudades de Valparaíso, San Antonio y Cartagena, comparando también con simulaciones bidimensionales, para validar y calibrar el modelo de energía en esas bahías. Extender el análisis a distintas bahías y formas de perfil, permitirá determinar mejor las limitaciones del método y las consideraciones prácticas a tener en función de las características topobatimétricas de los perfiles.



6. **REFERENCIAS**

ASCE. (2013). "Minimum design loads for buildings and other structures." ASCE/SEI 7-10, Reston, VA.

Berger, M. J., George, D. L., LeVeque, R. J., & Mandli, K. T. (2011). The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. Advances in Water Resources, 34(9), 1195-1206.

Bowers, C., Serafin, K. A., & Baker, J. W. (2021). A Performance-Based Approach to Quantify Atmospheric River Flood Risk. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 1-32.

Castro, S. (2022). Energy method for run-up estimation.

Kriebel, D. L., Lynett, P. J., Cox, D. T., Petroff, C. M., Robertson, I. N., & Chock, G. Y. (2017). Energy method for approximating overland tsunami flows. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 143(5).

Tada, T., Miyata, Y., & Bathurst, R. J. (2018). Energy Grade Line Analysis of Tsunami run-up on the Sendai Plain after the 2011 Tohoku earthquake. *Coastal Engineering*, *140*, 306-315.

Wiebe, D. M. (2013). Tsunami inundation: Estimating damage and predicting flow properties.