

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ASCE 7-22 PARA LA DETERMINACIÓN  
DE MAPAS DE INUNDACIÓN POR TSUNAMI EN LA CIUDAD DE CARTAGENA,  
REGIÓN DE VALPARAÍSO**

**MARÍA FERNANDA ESTRADA CARRASCO<sup>1</sup>**  
**RODRIGO CIENFUEGOS CARRASCO<sup>2</sup>**  
**ALEJANDRO URRUTIA<sup>3</sup>**

**RESUMEN**

El objetivo de este estudio es implementar y evaluar un modelo matemático simplificado en perfiles topobatimétricos (multi-1D), con la finalidad de utilizarlo en la generación de mapas de inundación por tsunami en las costas de Chile, como alternativa a los modelos bi-dimensionales que tiene costos computacionales elevados.

El enfoque se basa en modificar la metodología propuesta por la ASCE 7-22, donde es posible estimar las profundidades de inundación a lo largo de un perfil topobatimétrico a partir del valor de la cota de inundación máxima. La modificación propuesta en este trabajo consiste en obtener las distancias de inundación máximas a partir de las profundidades de inundación en la línea de costa, en lugar de hacerlo de forma inversa, como plantea el método original. Para lograr esto, se implementó un proceso iterativo que logra asegurar la convergencia al resultado deseado.

La metodología propuesta se implementa en la ciudad de Cartagena y se comparará con 1800 simulaciones de tsunami realizadas por un modelo que resuelve las ecuaciones no lineales de aguas someras. Se utiliza el estimador de error porcentual absoluto como métrica para determinar la aplicabilidad de la metodología simplificada. En base a los resultados obtenidos, se analiza el comportamiento de esta metodología incluyendo variaciones en el nivel del mar.

---

<sup>1</sup> Estudiante Postgrado, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: mfestrada@uc.cl

<sup>2</sup> Profesor Asociado, Departamento De Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile – email: racienfu@ing.puc.cl

<sup>3</sup> Ingeniero de Investigación en CIGIDEN -- email: alejandro.urrutia@cigiden.cl

En conclusión, se determina que la metodología es aplicable, siempre y cuando se tomen en cuenta ciertas restricciones del terreno vinculadas a la pendiente de entrada del perfil. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el modelo ofrece errores acotados que permiten su uso en la construcción de mapas de inundación y versatilidad y rapidez para la implementación de enfoques probabilísticos que requieren decenas de miles de escenarios. Además, proporciona una alternativa rápida para la exploración de escenarios relacionados con cambios en el nivel del mar.

## 1. INTRODUCCIÓN

El enfoque estándar para el estudio de la amenaza de eventos de tsunami se fundamenta en la investigación de un evento histórico de gran magnitud o en la simulación de un número limitado de eventos. Sin embargo, la incertidumbre asociada a la generación de terremotos tsunamigénicos futuros, requiere modelar decenas de miles de escenarios para construir curvas probabilísticas para las variables de intensidad. Esto es en la práctica muy costoso computacionalmente pues los estudios de inundación por tsunami utilizan en general modelos numéricos basados en ecuaciones bidimensionales no lineales de aguas someras que restringen su alcance a un número limitado de escenarios (González et al., 2020), debido a la alta demanda de recursos computacionales.

La *American Society of Civil Engineers* (ASCE) propuso en los años 2016 y 2022 una metodología simplificada para estimar las profundidades de inundación de tsunami a lo largo de perfiles topobatimétricos 1D, basándose en el principio de conservación de energía y utilizando información proporcionada por mapas de inundación previamente construidos.

El objetivo del presente trabajo es realizar modificaciones a la metodología ASCE 7-22, con el fin de obtener un método simple y de bajo costo computacional, que permita determinar las distancias de inundación máxima a partir de la profundidad de inundación en la costa, para la construcción de mapas de inundación. Esta nueva metodología será comparada con simulaciones completas de inundación por tsunami en la bahía de Cartagena, con el propósito de validar el método propuesto y determinar las restricciones inherentes respecto a condiciones topobatimétricas.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. MÉTODO DE ENERGÍA

La metodología de conservación de energía propuesta por la ASCE en 2022 establece que en el punto de máxima intrusión horizontal de inundación ( $x_R$ ), la energía específica ( $E_R$ ) es nula y va incrementándose gradualmente hacia la línea de costa, en función de la pendiente del terreno ( $\varphi$ ) y la pendiente de fricción ( $S$ ), como se observa en la Figura 1.

La ASCE (2022) propone la siguiente discretización de la ecuación de conservación de energía (1):

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

$$E_i = h_i + \frac{u_i^2}{2g} \quad (2)$$

donde  $E_i$  es la energía específica en el nodo discreto  $i$  (ver ecuación (2)),  $\varphi_i$  denota la pendiente media del terreno entre los nodos  $i$  y  $i - 1$ ,  $\Delta x_i$  representa la diferencia entre  $x_i$  y  $x_{i-1}$  y  $S_i$  corresponde a la pendiente de fricción entre los puntos  $i$  y  $i - 1$ .

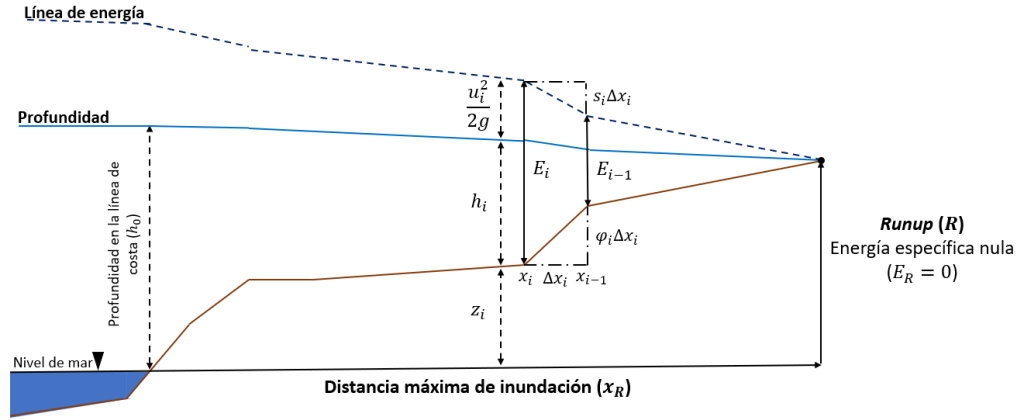


Figura 1: Método de energía para la obtención de la profundidad y velocidad de inundación de tsunamis en un perfil topobatiométrico. Nota: adaptado de “Minimum design loads for buildings and other structures.”, por ASCE. (2022)

La pendiente de fricción ( $S_i$ ) se determina mediante su relación con la fórmula de Manning, que se expresa en la ecuación (3), donde  $n$  corresponde al coeficiente de Manning. En este contexto, la ASCE (2022) considera que el radio hidráulico utilizado en dicha ecuación es igual a la profundidad de inundación.

$$S_i = \frac{u_i^2}{\left(\frac{1}{n}\right)^2 h_i^{\frac{4}{3}}} \quad (3)$$

La velocidad a lo largo del perfil se determina en función de la profundidad mediante su relación con el número adimensional de Froude, expresado en la ecuación (4). Al despejar la velocidad de esta relación y sustituir los términos en la ecuación (1), se obtiene la ecuación (5) para calcular la profundidad en el perfil.

$$F_i = \frac{u_i}{\sqrt{gh_i}} \quad (4)$$

$$h_i(1 + 0.5F_i^2) = h_{i-1}(1 + 0.5F_{i-1}^2) + \frac{gF_i^2}{\left(\frac{1}{n}\right)^2 h_i^{\frac{1}{3}}} \Delta x_i + \varphi_i \Delta x_i \quad (5)$$

La ASCE (2022) presenta una ecuación empírica para la determinar el número de Froude a lo largo del perfil, la cual se expresa en la ecuación (6). En dicha ecuación,  $F_0$  representa el valor de Froude en la línea de costa y  $x_R$  indica la distancia horizontal de inundación, obtenida a partir de los mapas de inundación. Por lo general, se asume que el valor de  $F_0$  es igual a 1 (ASCE, 2022).

$$F_i = F_0 \left(1 - \frac{x_i}{x_R}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Wiebe (2013) propuso una ecuación empírica para el decrecimiento lineal del valor del número de Froude, que se expresa en la ecuación (7). En esta ecuación, se añade el término  $c$ , el cual representa el número de Froude asociado al punto de intrusión máxima de inundación ( $x_R$ ).

$$F_i = F_0 + (c - F_0) \left( \frac{x_i}{x_R} \right) \quad (7)$$

## 2.2. PARÁMETROS DE LA ECUACIÓN EMPÍRICA DE FROUDE

En el presente estudio, se emplea la ecuación empírica propuesta por Wiebe (2013), ya que en su tesis el autor plantea que la ecuación con decrecimiento a la raíz cuadrada es aconsejable cuando las pendientes en la zona de inundación son menores a 0.002. Por otro lado, si la pendiente es mayor, se recomienda utilizar el decrecimiento lineal. Dado que el objetivo de este estudio es obtener la distancia máxima de inundación ( $x_R$ ) en función de la profundidad de inundación en la costa ( $h_0$ ), no se cuenta con conocimiento previo del valor de la pendiente en la zona de inundación. Por ende, se ha optado por utilizar la ecuación (7), como expone Wiebe (2013), para proporcionar menores errores al trabajar con pendientes más pronunciadas.

El valor de los parámetros  $F_0$  y  $c$  está directamente relacionado con el coeficiente de Manning  $n$  empleado en el sitio de estudio. Dado que la ciudad de Cartagena se encuentra urbanizada, se utilizará un coeficiente de  $n=0.04$ , que corresponde a un terreno con edificaciones según lo establecido por la ASCE (2022). Con base en este valor y siguiendo los rangos propuestos por Wiebe (2013), se determina que el valor apropiado para  $F_0$  en la línea de costa es de 0.8, mientras que el valor adecuado para  $c$  es de 0.5.

## 2.3. MODIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

El propósito de esta investigación es obtener la distancia máxima de inundación ( $x_R$ ) en un perfil a partir de la información de profundidad de inundación en la costa ( $h_0$ ). Sin embargo, el valor de  $x_R$  debe ser conocido previamente si se desea utilizar la ecuación empírica del número de Froude. Para superar esta limitación, se ha desarrollado una nueva metodología basada en la iteración del valor de  $x_R$  con el objetivo de alcanzar una profundidad  $h_{proyectada}$  equivalente en la costa al valor inicial de  $h_0$ . De esta manera, se busca resolver el problema de obtener la distancia máxima de inundación sin requerir conocimiento previo de esta.

Antes de iniciar el proceso iterativo en el perfil, es necesario establecer los valores mínimo y máximo posibles que puede alcanzar la distancia máxima de inundación ( $x_R$ ), los cuales dependen de las características del perfil. El valor mínimo ( $x_{min}$ ) de inundación siempre será igual a cero, mientras que el valor máximo de inundación ( $x_{max}$ ) se determinará como la distancia horizontal en la cual el terreno alcance una altitud igual a la energía de entrada en la línea de costa  $E_0$ , como se describe en la ecuación (8).

$$E_0 = h_0 + \frac{1}{2} F_0^2 h_0 \quad (8)$$

Posteriormente, se procede a obtener el primer valor de la distancia máxima de inundación ( $x_R^0$ ) para dar inicio al proceso iterativo. Este valor se obtiene proyectando la profundidad de inundación  $h_0$  desde la línea de costa hacia el terreno, mediante la utilización de la ecuación (9). En esta ecuación, se considera que no existe un decrecimiento del número de Froude y que este es constante e igual a  $F_0$  en todo el perfil. De esta manera, se obtiene el primer valor de  $x_R^0$ , que se emplea como punto de partida para dar inicio al proceso iterativo.

$$h_i \left( 1 + \frac{F_0^2}{2} \right) = h_{i-1} \left( 1 + \frac{F_0^2}{2} \right) + \frac{gF_0^2}{\left( \frac{1}{n} \right)^2 h_i^{\frac{1}{3}}} \Delta x_i + \varphi_i \Delta x_i \quad (9)$$

A partir de valor de  $x_R^0$ , se proyecta la profundidad desde la zona de inundación hacia la línea de costa utilizando las ecuaciones (5) y (7), junto con los valores de  $F_0$  igual a 0.8 y  $c$  igual a 0.5. Esto proporciona un primer valor de profundidad proyectada  $h_{proyectada}^0$ , en la línea de costa, el cual se compara con el valor de profundidad de inundación inicial,  $h_0$ . Después de realizar la comparación, se pueden presentar tres casos distintos:

1. La profundidad  $h_{proyectada}^k$  es menor a la profundidad de inundación inicial  $h_0$ :

En esta situación, se mantiene el valor de  $x_{max}$  mientras que  $x_{min}$  se actualiza con el valor de  $x_R^k$ . A continuación, se calcula el nuevo valor de distancia máxima de inundación,  $x_R^{k+1}$ , mediante la ecuación (10). Una vez obtenido el nuevo valor de  $x_R^{k+1}$ , se realiza una nueva proyección desde este punto hacia la línea de costa para obtener el valor de  $h_{proyectada}^{k+1}$ .

$$x_r^{k+1} = \frac{x_{max} - x_{min}}{2} + x_{min} \quad \forall k = 0, 1, \dots, K \quad (10)$$

2. La profundidad  $h_{proyectada}^k$  es mayor a la profundidad de inundación inicial  $h_0$ :

En este escenario, se actualiza el valor de  $x_{max}$  con el valor de  $x_R^k$ , mientras que  $x_{min}$  se mantiene sin cambios. Luego, se procede a calcular el nuevo valor de distancia máxima de inundación,  $x_R^{k+1}$ , empleando la ecuación (10). Al igual que en la situación previa, se realiza la proyección de la profundidad desde  $x_r^{k+1}$  hacia la costa para obtener el valor de  $h_{proyectada}^{k+1}$ .

3. La profundidad  $h_{proyectada}^k$  es igual a la profundidad de inundación inicial  $h_0$ :

La iteración se considera finalizada bajo tres condiciones: en primer lugar, si las profundidades son iguales con una diferencia de 1 cm o menos entre ambas, teniendo en cuenta la discretización con valores enteros de  $x_R$ . En segundo lugar, si el valor de  $x_{max}$  es exactamente igual al valor de  $x_{min}$ , lo que indica que no hay cambios significativos en las distancias de inundación. Por último, si el valor de  $x_R^{k+1}$  es idéntico al valor de  $x_R^{k+2}$  en iteraciones sucesivas, lo que sugiere que el proceso ha convergido y no se obtendrán cambios adicionales en la distancia máxima de inundación. Bajo estas condiciones, se concluye la iteración.

Una vez finalizado el proceso iterativo para una profundidad  $h_0$ , se almacenan los valores de distancia máxima de inundación ( $x_R$ ) y el *runup* ( $R$ ) asociado a dicha inundación.

## 2.4. CASO DE ESTUDIO

La metodología iterativa propuesta será implementada en la ciudad de Cartagena (Región de Valparaíso), para lo cual se han construido 142 perfiles ortogonales a la línea de costa. Estos perfiles se muestran en la Figura 2, la cual también proporciona una visualización de la topografía de la ciudad.

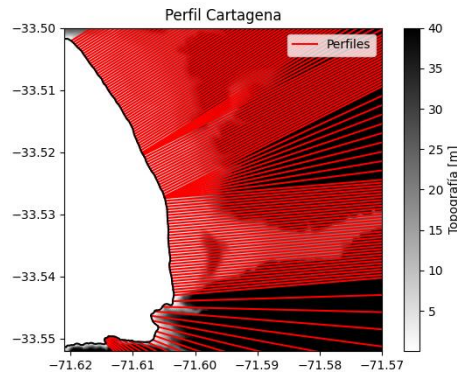


Figura 2: Perfiles ortogonales a la línea de costa en la ciudad de Cartagena, Región de Valparaíso.

Las profundidades en la línea de costa necesarias para implementar la metodología se extraen de las simulaciones de tsunami obtenidas mediante la modelación en GeoClaw, software que resuelve ecuaciones no lineales de aguas someras usando un método de captura *shocks* integrando en volúmenes finitos (Berger et al., 2011). Las fuentes de rupturas de terremotos sintéticos utilizadas en las simulaciones en GeoClaw son seleccionadas con una magnitud suficiente para generar tsunamis en la zona de estudio (Cortez et al., 2022).

Este conjunto de datos contiene 1800 escenarios de inundación, y para cada escenario se dispone de una malla de 551 columnas y 562 filas con valores de profundidades. Para obtener la profundidad en el inicio de un perfil correspondiente a cada escenario, se llevó a cabo una interpolación de la malla en los puntos de inicio de los 142 perfiles.

En este caso, el valor de  $\Delta x_i$  presente en la ecuación (8) se ha establecido de forma fija e igual a 1 m para el proceso iterativo, en concordancia con las recomendaciones de la ASCE (2022), que indican que la discretización en  $x$  no debe superar los 30 m.

## 2.4. ESTIMADORES DE ERROR

Con el fin de comparar los resultados del proceso iterativo 1D con los resultados de la simulación 2D de GeoClaw, se procedió a superponer los datos de las mallas en los perfiles ortogonales construidos. De esta manera, se registraron en cada uno de los perfiles la distancia máxima de

inundación de  $x_{R\text{ GEOCLAW}}$  y el *runup*  $R_{\text{GEOCLAW}}$  para todos los escenarios, permitiendo así una comparación con los valores obtenidos mediante el proceso iterativo.

En este estudio, se emplea el estimador del error porcentual absoluto medio, conocido como MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). Se calcula el error porcentual total para la ciudad, utilizando la ecuación (11). Además, se calcula el error porcentual para cada uno de los perfiles considerando los 1800 escenarios mediante la ecuación (12). Asimismo, se calculará el error porcentual por escenario, tomando en cuenta los 142 perfiles, mediante la ecuación (13). Para cada escenario, también se calcula la profundidad de inundación promedio en la línea de costa utilizando la ecuación (14).

$$\text{Error \% Ciudad} = \frac{\sum_{i=1}^{I=142} \sum_{j=1}^{J=1800} \left| \frac{(x_{R,i,j} - x_{R\text{ GEOCLAW},i,j})}{x_{R\text{ GEOCLAW},i,j}} \right| * 100}{I * J} \quad (11)$$

$$\text{Error \% Perfil}_i = \frac{\sum_{j=1}^{J=1800} \left| \frac{(x_{R,i,j} - x_{R\text{ GEOCLAW},i,j})}{x_{R\text{ GEOCLAW},i,j}} \right| * 100}{J} \quad (12)$$

$$\text{Error \% Escenario}_j = \frac{\sum_{i=1}^{I=142} \left| \frac{(x_{R,i,j} - x_{R\text{ GEOCLAW},i,j})}{x_{R\text{ GEOCLAW},i,j}} \right| * 100}{I} \quad (13)$$

$$\overline{h_{0j}} = \frac{\sum_{i=1}^{I=142} h_{0i,j}}{I} \quad (14)$$

### 3. RESULTADOS

Al implementar la metodología iterativa para los 1800 escenarios en la ciudad de Cartagena, se obtiene que el error porcentual promedio de la distancia máxima de inundación de la ciudad es de un 24%. En la Figura 3 se presentan los errores porcentuales absolutos medios de distancia máxima de inundación de cada uno de los perfiles considerando los 1800 escenarios. Resulta que el 20% de los perfiles topobatimétricos de la ciudad exhiben errores que superan el 30%, mientras que un 2% de dichos perfiles presentan errores mayores a 100%. Estos perfiles, caracterizados por pendientes iniciales superiores a 0.08 en las proximidades a la línea de costa, son los responsables de estas desviaciones significativas.

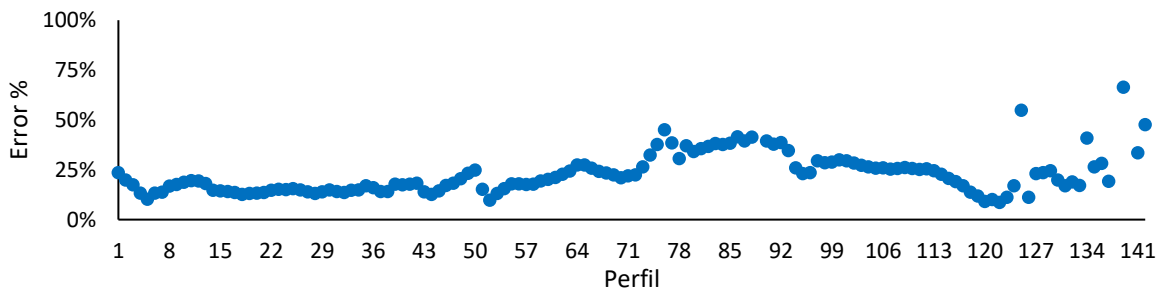


Figura 3: Error porcentual en la distancia máxima de inundación máxima por perfil en la ciudad de Cartagena.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis del error porcentual por escenario en relación con la profundidad de inundación promedio en la línea de costa. A partir de la Figura 4, se observa que los mayores errores se presentan cuando la profundidad de inundación promedio en la costa es menor a 2 metros. Es importante resaltar que un 86% de los escenarios exhiben un error porcentual medio igual o inferior al 30%, mientras que únicamente un 0,9% de los escenarios presentan un error mayor a 50%. Al promediar los errores por escenario, se tiene un error promedio por escenario de 24.7%, valor bastante similar al error por ciudad obtenido anteriormente.

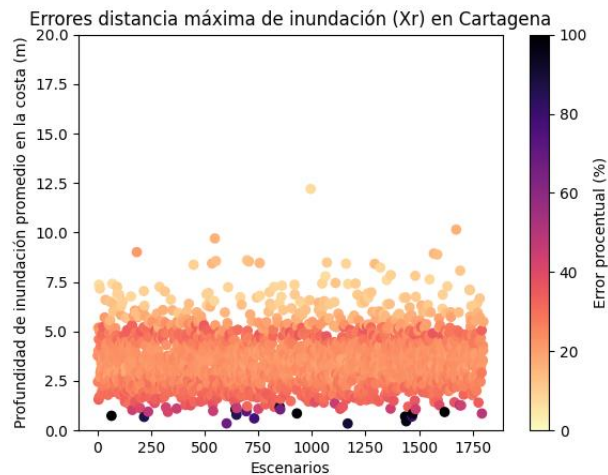


Figura 4: Error porcentual de distancia máxima de inundación por escenario en función de la profundidad de inundación promedio en la costa.

En la Figura 5a, se muestra el escenario con el error porcentual más alto por evento, alcanzado un 190%, para una profundidad media de inundación en la línea de costa de 0.74 metros. Aunque este error es significativo, su impacto visual es insignificante. Esto se debe a que en presencia de profundidades de inundación más bajas, la distancia máxima de inundación también son menores, lo que resulta en variaciones de 1 metro que pueden traducirse en un error del 50% o más. Sin embargo, desde una perspectiva de precisión, una diferencia de 1 metro en la excursión horizontal no tiene un efecto considerable al evaluar la amenaza de tsunami.

Adicionalmente, al considerar el análisis realizado por perfil, se constata que aquellos perfiles con pendientes superiores a 0.08 en las proximidades de la línea de costa exhiben errores más pronunciados. En situaciones en las que las profundidades de inundación son reducidas, se observa una tendencia de las distancias máximas de inundación a agruparse cerca de las áreas de pendientes acentuadas, lo que resulta en errores más notorios en estos casos.

Esta situación se justifica debido a que la modelación ejecutada en GeoClaw incorpora elementos físicos fundamentales como el hundimiento del terreno y la propagación de la onda de tsunami, factores que no son replicados en la metodología simplificada. Esta discrepancia puede ser una de las causantes subyacentes por las cuales, en situaciones de profundidades de entrada reducidas y en presencia de pendientes abruptas, se manifiestan errores de consideración en sus valores.

Por otro lado, en la Figura 5b se ilustra un escenario con un error porcentual por escenario más bajo, de tan solo 7.3%, correspondiente a una profundidad promedio en la línea de costa de 7.4 metros. En este caso, la simulación se ajusta de manera más precisa a los resultados obtenidos con

GeoClaw. Esto se justifica por la mayor profundidad de entrada en este escenario, lo que conlleva a una distancia máxima de inundación más amplia y, además, esta se localiza en áreas con pendientes menores a 0.08, lo que contribuye a una disminución del error.

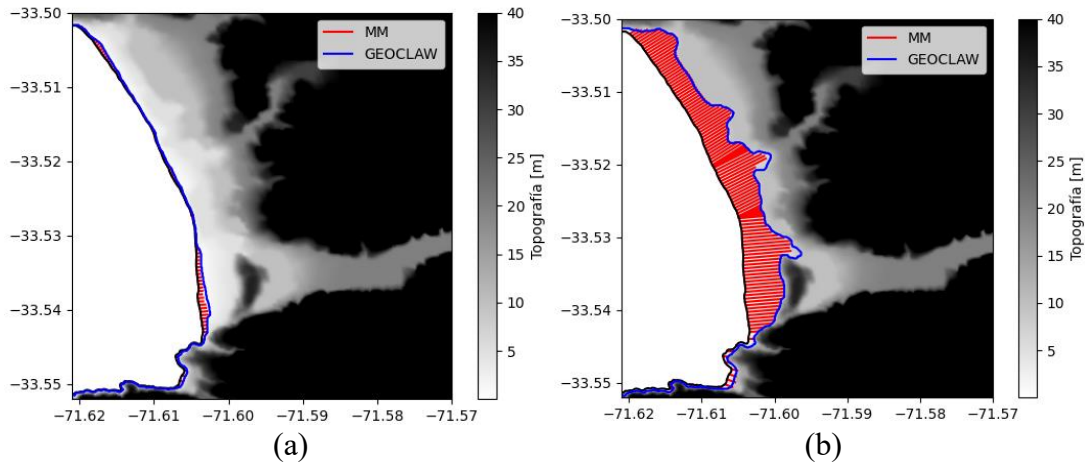


Figura 5: Representación gráfica de la comparación entre la distancia máxima de inundación obtenida mediante el modelo modificado (MM) y la línea de inundación simulada en GeoClaw para un escenario específico con una profundidad promedio en la costa de (a) 0.74 metros y (b) 7.4 metros.

#### 4. DISCUSIÓN

En base a los resultados y el rango de errores identificados, se propone la consideración de la metodología simplificada modificada para la estimación de distancia máxima de inundación en la ciudad de Cartagena. Es relevante tener en cuenta las limitaciones asociadas a perfiles con pendientes superiores a 0.08 y profundidades de inundación reducidas (menores a 2 metros). Esta recomendación encuentra respaldo en el trabajo de Kriebel et al. (2017), quienes establecen que la metodología es aconsejable para pendientes en el rango de -0.04 a 0.06 en el punto de inundación. Este intervalo fue empleado por los autores como base para validar la metodología en base a la conservación de energía propuesta por la ASCE. En consecuencia, es importante considerar que fuera de este rango podrían surgir errores. Sin embargo, al proporcionar al modelo las profundidades de inundación en la línea de costa, es factible llevar a cabo un número significativo de simulaciones de manera eficiente.

Desde la perspectiva de eficiencia temporal, la ejecución de una simulación de escenario para los 142 perfiles requiere aproximadamente 0.4 segundos en una computadora personal. Por el contrario, en GeoClaw, cada simulación demandó 12 horas de procesamiento con el uso de 12 procesadores. Completar 1800 escenarios distintos toma alrededor de 10 minutos con la metodología modificada, en contraste con los aproximados 2 meses requeridos en GeoClaw utilizando 48 procesadores. Esta implementación de la metodología modificada permitiría la realización de hasta 10,000 simulaciones en tan solo 1 hora, en comparación con los varios meses de simulación necesarios para GeoClaw, ejecutado en un *cluster* de procesadores.

Además de los resultados presentes en la sección anterior, se procedió a evaluar la efectividad de la metodología modificada al analizar eventos en condiciones de diferentes niveles del mar. Esta evaluación es relevante en el contexto del cambio climático, que puede dar lugar a un aumento paulatino del nivel del mar. Para este propósito se llevaron a cabo tres conjuntos de 548 simulaciones en GeoClaw, abarcando el nivel actual del mar, así como un aumento del nivel del mar en 1 y 2 metros. Para cada uno de estos niveles de mar, se emplearon las respectivas profundidades de inundación en las líneas de costa de cada escenario, lo que implica que las profundidades difieren en función de la nueva posición de la línea de costa en cada caso asociado al aumento nivel de mar. Posteriormente, se ejecutó la metodología modificada y se obtuvieron distancias máximas de inundación.

Con el propósito de facilitar la visualización del impacto del nivel del mar, a pesar de que las distancias de inundación derivan de la información correspondiente a las respectivas líneas de costa, los resultados se expresan en relación con el sistema de referencia del nivel actual de mar. Este enfoque se ilustra en la Figura 6, donde se presenta un mismo escenario con tres niveles de mar distintos, permitiendo apreciar cómo el aumento del nivel del mar conlleva a una mayor expresión de inundación en la ciudad de Cartagena.

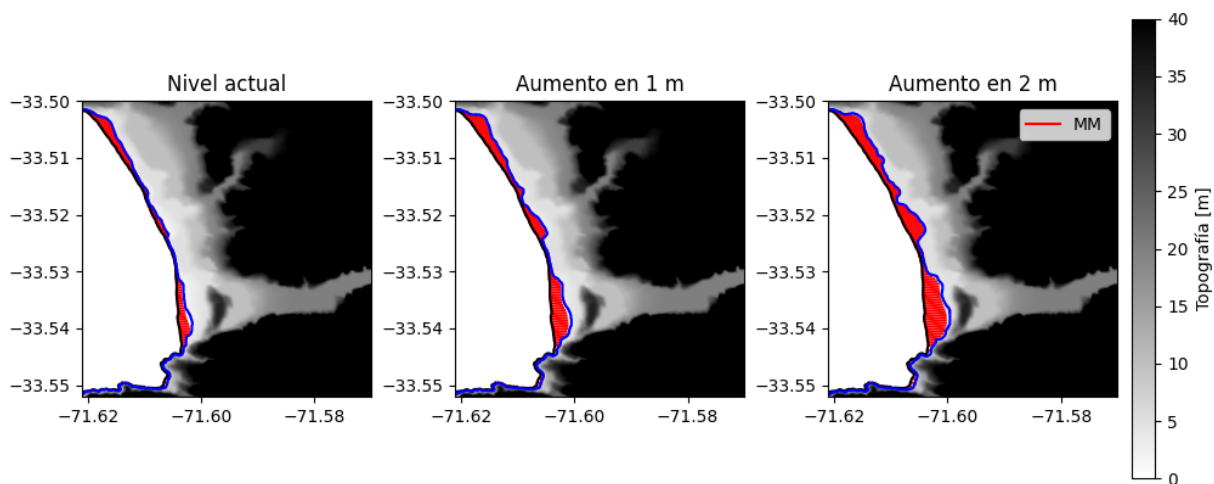


Figura 6: Comparativa visual entre la distancia máxima de inundación obtenida a través del modelo modificado (MM) y la línea de inundación simulada en GeoClaw. Los escenarios consideran profundidades promedio de inundación en la línea de costa de 1.82, 1.87 y 1.93 metros, correspondientes a niveles del mar de 0, 1 y 2 metros, respectivamente.

Al analizar los errores por ciudad obtenidos en cada conjunto de simulaciones con variaciones en el nivel del mar, se observa que el error promedio en distancia máxima de inundación por ciudad sin cambio en el nivel del mar es del 26%, valor similar al obtenido en las 1800 simulaciones. Estos errores disminuyen a un 23% para un aumento del nivel del mar de 1 metro y a un 18% para un aumento del nivel del mar de 2 metros. Esta tendencia es positiva, ya que indica que el modelo no empeora su porcentaje de error a medida que se modifica el nivel del mar.

La Figura 7 exhibe la representación del error porcentual por perfil para cada escenario del nivel del mar. Utilizando un umbral de referencia del 30% para el análisis, se puede apreciar que para el nivel actual del mar, así como para los aumentos de 1 y 2 metros, los porcentajes de perfiles con

errores menores a dicho umbral son de 71%, 93% y 92% respectivamente. Esta tendencia muestra entonces mejoras en la estimación a medida que se incrementa el nivel del mar. Es importante resaltar que los mayores errores, en proporción al aumento del nivel del mar, se localizan en la zona sur de Cartagena, la cual presenta perfiles con pendientes superiores a 0.1 debido a la presencia de formaciones rocosas. En relación a los errores promedio por escenario, se constata que para el nivel actual del mar, el 83.6% de los escenarios se encuentran con un margen de error inferior al 30%. Para los aumentos de 1 y 2 metros en el nivel del mar, estos valores se elevan significativamente a 99.8% y 100%, lo cual indica que la precisión experimenta una notable mejora a medida que el nivel del mar incrementa, lo que es consistente con las restricciones identificadas en el apartado anterior.

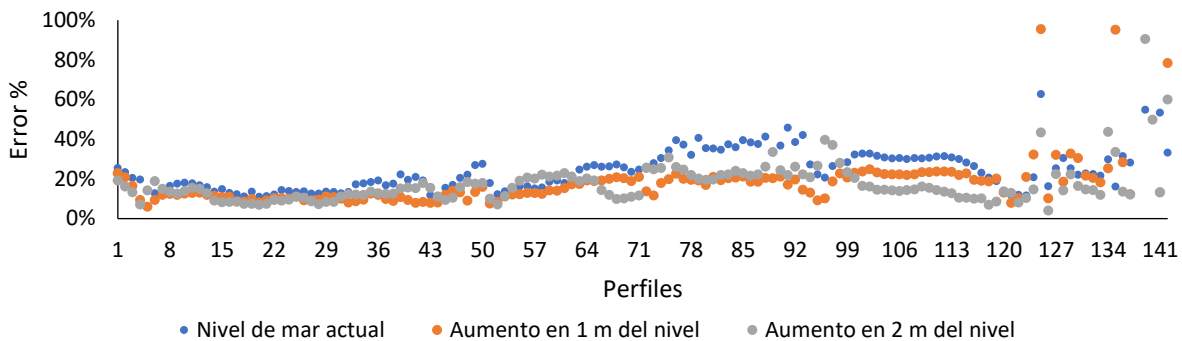


Figura 7: Error porcentual en la distancia máxima de inundación por perfil en la ciudad de Cartagena, considerado un aumento de nivel de 0, 1 y 2 metros, respectivamente.

Al correlacionar estos resultados con el análisis previo, se constata que a medida que se incrementa el nivel del mar, la porción de terreno con pendientes pronunciadas en las proximidades de la línea de costa tiende a reducirse. Este fenómeno conlleva una disminución de errores observados, lo que refuerza la idea de que pendientes abruptas cercanas a la línea de costa están relacionadas con errores en la metodología. Por lo tanto, al considerar la aplicación de esta metodología en otras ciudades, se recomienda realizar un minucioso análisis topobatemétrico para identificar la posible presencia de pendientes pronunciadas en la línea de costa. Un caso ejemplar es la ciudad de Valparaíso, donde la configuración portuaria ha dado lugar a fuertes pendientes en las proximidades de la costa, lo que podría generar errores.

## 5. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos revelan que este estudio ofrece fundamentos que posibilitan la aplicación de la metodología modificada de la ASCE 7-22, teniendo en cuenta las restricciones de terreno en la ciudad de Cartagena, específicamente las pendientes pronunciadas (mayores a 0.08) cercanas a la línea de costa. Los errores identificados se mantienen acotados y resultan aceptables en vista de la amplia cantidad de simulaciones realizadas. Es destacable resaltar que esta metodología está diseñada para afrontar numerosas simulaciones, beneficiándose de su eficiente velocidad de procesamiento, lo que la convierte en una herramienta para enfoques probabilísticos en la creación de mapas de inundación.

Además, se sometió la metodología a pruebas bajo tres condiciones de nivel del mar: la condición actual, un aumento de 1 metro y un aumento de 2 metros. A partir de estas evaluaciones, se desprenden dos conclusiones significativas. En primer lugar, la metodología no solo mantiene su eficiencia a medida que el nivel del mar se eleva, sino que realmente mejora su desempeño en tales condiciones. En segundo lugar, la reducción del error, al aumentar el nivel, se atribuye directamente a la disminución de áreas con pendientes abruptas en la línea de costa. Este hallazgo enfatiza la importancia de tener en cuenta la topografía de los perfiles al aplicar la metodología en otras localidades del país.

Los próximos pasos comprenden la implementación de la metodología modificada en las ciudades de Viña del Mar y Valparaíso, que se caracterizan por exhibir pendientes costeras superiores a 0.06. Esta iniciativa permitirá una exploración más profunda de las restricciones inherentes a la metodología y su relación con los supuestos subyacentes en la descripción de la velocidad en función de la profundidad de inundación y el número de Froude a lo largo del perfil. Con este propósito, se buscará la manera de adaptar la metodología, ya sea limitando la selección de perfiles o ajustando los parámetros utilizados en este estudio, con el fin de minimizar el margen de error.

## REFERENCIAS

ASCE. (2022). "Minimum design loads for buildings and other structures." ASCE/SEI 7-22, 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.

Cortez, C., Jünemann, R., Fernández, C., Urrutia, A., Crempien, J. G. F., & Cienfuegos, R. (2022). Performance of an RC building under seismic and tsunami actions in sequence via nonlinear dynamic analysis including soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 272, 114942.

González, J., González, G., Aranguiz, R., Melgar, D., Zamora, N., Shrivastava, M. N., ... & Cienfuegos, R. (2020). A hybrid deterministic and stochastic approach for tsunami hazard assessment in Iquique, Chile. *Natural Hazards*, 100(1), 231-254.

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)

Wiebe, D. M. (2013). Tsunami inundation: Estimating damage and predicting flow properties. *M.S. thesis, Oregon State Univ., Corvallis, OR.*