



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR TSUNAMIS EN ZONAS COSTERAS DE CHILE

Memoria de Título presentada por

Guillermo Maulén Zanga

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Patricio Catalán Moncada

AGOSTO, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Análisis de la amenaza por tsunamis en zonas costeras de Chile

Nombre del candidato(a): Guillermo Enrique Maulén Zanga

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Patricio A. Catalán, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

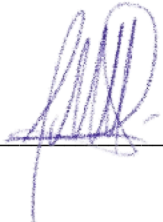
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 17 AGO 2026 Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 14/08/2026 Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

ANÁLISIS DE LA AMENAZA POR TSUNAMIS EN ZONAS COSTERAS DE CHILE

Guillermo Maulén Zanga, Patricio Catalán Moncada

Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Estimar la inundación que produce un tsunami exige resolver las ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSW) sobre batimetría de alta resolución, un cálculo costoso que se vuelve impracticable cuando se necesitan decenas de miles de escenarios. Una alternativa es el método de los factores de amplificación (AF), que estima la máxima altura de inundación (MIH) a partir de la altura de ola en una isóbata de referencia. En este trabajo se calculan y validan factores de amplificación en ocho localidades de la costa de Chile, siguiendo a Glimsdal et al. (2019). El factor de cada transecto se calibra como la mediana del cociente entre el MIH y la altura de ola en la isóbata de 50 m, sobre un catálogo de simulaciones NLSW de hasta 4488 escenarios por localidad, con magnitudes de momento entre 7.5 y 9.4. La validación se realiza fuera de muestra, con validación cruzada de cinco particiones estratificada por magnitud, mediante un paquete computacional reproducible (**tsamfapy**). El factor calibrado predice la inundación con un error absoluto medio de 0.35 a 0.71 m y un R^2 de 0.88 a 0.96 según la localidad, reduciendo entre 22 % y 59 % el error de la predicción sin factor. La ley de Green, en cambio, sobreestima la inundación con errores medios de 2.5 a 4.8 m. La incertidumbre del factor (σ_{RMS} entre 0.38 y 1.37) es comparable con la reportada en la literatura, aunque varía fuertemente entre localidades. Se concluye que el factor de amplificación calibrado localmente es una alternativa viable y de bajo costo para estimar la inundación por tsunami en la costa chilena.

Índice

1. Introducción	3
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos específicos	3
2.3. Alcance	4
3. Metodología	4
3.1. Variables de la onda y notación	4
3.2. Definición de los factores de amplificación	5
3.3. Geometría de transectos	5
3.4. Datum vertical y cálculo del MIH	6
3.5. Calibración y validación cruzada	7
3.6. Incertidumbre del factor calibrado	8
4. Datos y zona de estudio	9
5. Implementación computacional	9
6. Resultados	9
6.1. Geometría y factores calibrados	10
6.2. Validación cruzada fuera de muestra	10
6.3. Comparación con la ley de Green	13
6.4. Incertidumbre del factor calibrado	13
6.5. Contraste de desempeño entre localidades	16
7. Discusión	17
7.1. Comparación con el estudio de referencia	17
7.2. Mecanismos observados	17
7.3. Limitaciones	20
Anexo A. Reproducibilidad	22

1. Introducción

Cuando un tsunami se aproxima a la costa y la profundidad del fondo disminuye, la conservación del flujo de energía obliga a la ola a amplificarse. Cuánto se amplifica depende de la batimetría y la morfología de cada tramo de costa. La premisa del método de factores de amplificación (AF) es que esa amplificación es una propiedad esencialmente local. Si se la caracteriza una sola vez para cada tramo de costa, la inundación de cualquier escenario nuevo puede estimarse a partir de su altura de ola en mar abierto, sin simular en detalle la propagación costera.

La alternativa exacta corresponde a resolver cada escenario con ecuaciones no lineales de aguas someras (NLSW) sobre batimetría de alta resolución. Es una opción precisa, pero su costo computacional la vuelve impracticable a la escala que exigen los análisis modernos, ya que un análisis probabilístico de amenaza de tsunami (PTHA) requiere evaluar varios miles de escenarios por localidad (Behrens et al., 2021). La disyuntiva es especialmente pertinente en Chile, ubicado sobre una de las zonas de subducción más activas del mundo (Madariaga, 1998) y con una exposición costera que crece con la densificación urbana (León Canales et al., 2019). En ese contexto, el método AF ofrece un camino intermedio. Este método fue introducido en evaluaciones de amenaza a escala global (Løvholt et al., 2012) y formulado en detalle por Glimsdal et al. (2019) para la región del Atlántico nororiental y el Mediterráneo (NEAM). En esa formulación, la altura de ola en una isóbata de referencia se amplifica con un factor propio de cada transecto, obtenido de simulaciones lineales de aguas someras sobre el perfil batimétrico local, y la altura amplificada resultante se usa como estimador de la máxima altura de inundación (MIH). Las simulaciones NLSW de alta resolución cumplen ahí el rol de referencia, ya que permiten cuantificar el sesgo y la incertidumbre de esa estimación. En este trabajo, al no disponerse de series de tiempo ni de un simulador lineal, el factor se calibra de forma empírica desde el propio catálogo de simulaciones NLSW y se valida fuera de muestra contra ese mismo catálogo, según se detalla en la Sección 3.

El documento se organiza como sigue. La Sección 2 establece los objetivos del trabajo y su alcance; la Sección 3 describe el método y las decisiones de implementación; la Sección 4 presenta el catálogo de simulaciones y las localidades de estudio; la Sección 5 resume la implementación computacional y su trazabilidad; la Sección 6 reporta los resultados de calibración, validación e incertidumbre; y la Sección 7 discute los mecanismos físicos observados y las limitaciones, antes de las conclusiones.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Implementar el método de factores de amplificación en el análisis probabilístico de amenaza por tsunamis (PTHA), con el fin de explorar mejoras en la eficiencia computacional del proceso, evaluando la precisión de los resultados con un modelo de referencia.

2.2. Objetivos específicos

1. Adaptar e implementar el método de factores de amplificación descrito por Glimsdal et al. (2019) en el análisis probabilístico de la amenaza por tsunamis.

2. Comparar estadísticamente los resultados del análisis probabilístico de la amenaza por tsunamis del método de AF frente al obtenido mediante simulaciones NLSW generadas previamente con el modelo Tsunami-HySEA, validado en estudios como el de Macías et al. (2020), en cinco sitios.
3. Estimar probabilísticamente la amenaza por tsunamis en sitios costeros, mediante el cálculo de curvas de amenaza para la altura máxima de inundación (MIH).

2.3. Alcance

El alcance efectivo de esta memoria se concentra en el cálculo y la validación de los factores de amplificación. La construcción de un análisis de amenaza completo, con tasas de recurrencia sísmica y agregación de fuentes, queda fuera del trabajo, por lo que las curvas de amenaza del tercer objetivo se abordan en su forma condicional, dado un escenario de referencia, con el factor calibrado y su incertidumbre como insumo directo. Respecto del compromiso original, la comparación estadística del segundo objetivo se extendió de cinco a ocho localidades (Sección 4).

3. Metodología

La metodología sigue a Glimsdal et al. (2019), adaptada a la naturaleza de los datos disponibles (campos de máximos de simulaciones NLSW, sin series de tiempo).

3.1. Variables de la onda y notación

La Figura 1 define las variables que caracterizan una onda: el desplazamiento instantáneo de la superficie libre respecto del nivel de reposo η , la amplitud a , la altura de ola H , la longitud de onda L , el período T y la celeridad c . En este trabajo la única variable de onda disponible es el máximo del desplazamiento de la superficie libre en cada punto del dominio (los campos de máximos de las simulaciones NLSW), por lo que toda altura de ola se denota con η y corresponde a ese máximo; las profundidades se denotan con h . Las variables de fase (L , T , c) no son observables desde campos de máximos, lo que delimita qué componentes del método de referencia pueden implementarse (Sección 7).

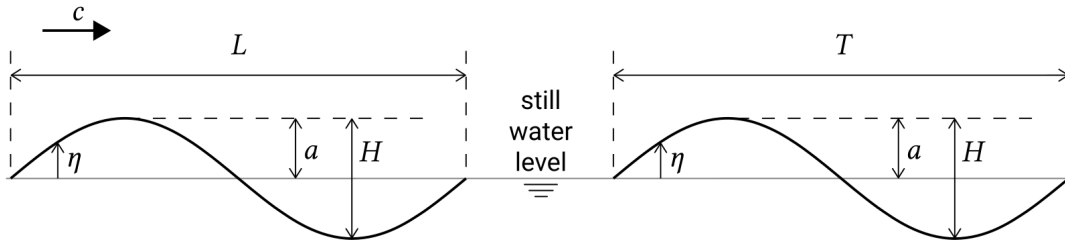


Figura 1: Definición de las variables que caracterizan una onda: desplazamiento de la superficie libre η , amplitud a , altura de ola H , longitud de onda L (perfil espacial, izquierda), período T (registro temporal, derecha) y celeridad c , respecto del nivel de aguas quietas. Elaboración propia.

3.2. Definición de los factores de amplificación

Para cada transecto t perpendicular a la costa y cada escenario s , se definen dos factores a partir de la altura máxima de ola η_{50} en el cruce del transecto con la isóbata de 50 m:

$$F_{t,s}^{amp} = \frac{\eta_{costa}}{\eta_{50}} \quad (1)$$

donde η_{costa} es la altura máxima de ola leída puntualmente en la línea de costa, siguiendo la definición puntual del factor de Glimsdal et al. (2019) (su Fig. 6); y

$$F_{t,s} = \frac{MIH_{t,s}}{\eta_{50}} \quad (2)$$

donde $MIH_{t,s}$ es la máxima altura de inundación sobre el tramo en tierra del transecto. El factor de la Ecuación 2 es la métrica de calibración y validación de este trabajo, por relacionar la altura offshore directamente con la variable objetivo del método (la inundación máxima). Cuando un transecto no registra inundación en tierra para un escenario, el par (s, t) queda indefinido y se excluye del análisis (no se imputa).

El factor calibrado de cada transecto, $\tilde{F}_t$, es la mediana de $F_{t,s}$ sobre los escenarios de entrenamiento, y la predicción para un escenario nuevo es la altura amplificada:

$$AH_{t,s} = \tilde{F}_t \eta_{50} \quad (3)$$

donde $AH_{t,s}$ es la estimación de $MIH_{t,s}$ sin simulación costera. Como referencia teórica se utiliza además la ley de Green (Green, 1838), que describe el crecimiento de la altura de una onda larga lineal al disminuir la profundidad, por conservación del flujo de energía:

$$\frac{\eta_{ref}}{\eta_{50}} = \left(\frac{h_{50}}{h_{ref}} \right)^{1/4} = A_G \quad (4)$$

donde η_{ref} es la altura de ola amplificada a la profundidad somera de referencia h_{ref} y A_G el factor de amplificación teórico resultante. Siguiendo a Glimsdal et al. (2019) se adopta $h_{ref} = 0.5$ m (la ley diverge en profundidad nula), de modo que con $h_{50} = 50$ m resulta $A_G = 100^{1/4} \approx 3.16$. La ley es válida para ondas lineales y no rompientes, bajo pendiente uniforme y en ausencia de reflexión y disipación. Las costas reales presentan pendientes variables, plataformas y taludes que participan de la transferencia de energía, por lo que la amplificación efectiva depende de la morfología batimétrica local y no solo de la profundidad. El método AF conserva el principio energético de la ley de Green, pero reemplaza la relación teórica por una empírica calibrada con simulaciones, extendiéndola a condiciones costeras complejas.

3.3. Geometría de transectos

La línea de costa se extrae como la isolínea de nivel cero de la batimetría y se muestrea cada 0.01° (≈ 1.1 km); de cada segmento nacen seis transectos perpendiculares, generados en una proyección métrica local. El largo de los transectos se estima por localidad como la distancia máxima entre la costa y la isóbata de 50 m más un margen del 20 %. Cada transecto queda caracterizado por cuatro puntos: el cruce de su propio rayo con la isóbata de 50 m (donde se lee η_{50} , por interpolación lineal del campo, continuo en mar abierto); el punto de costa más cercano (donde se lee η_{costa} , por vecino

más cercano, dado que la transición mar–tierra es una discontinuidad real que la interpolación lineal contamina); el cruce del eje del transecto con la costa, que define el inicio del tramo en tierra; y el límite de inundación sobre el eje. La distinción entre el punto de costa más cercano y el cruce del eje con la costa es relevante. El muestreo de la costa con cuerdas corta las esquinas de la curvatura, y definir el tramo en tierra desde el punto más cercano produce tramos diagonales que leen agua ajena al transecto. La Figura 2 esquematiza esta geometría. La geometría se construye una única vez por localidad, sobre un escenario de referencia.

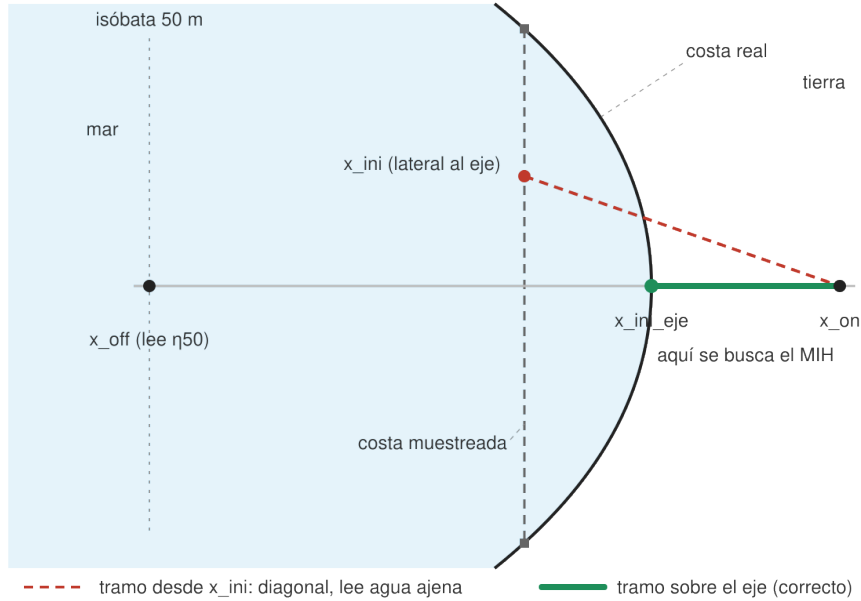


Figura 2: Esquema en planta de la geometría de un transecto en una bahía cóncava. La costa real (isolínea 0 de la batimetría) es una curva continua; la costa muestreada (puntos cada 0.01° unidos por cuerdas) la aproxima y, en tramos curvos, queda tendida sobre el mar. Sobre el eje del transecto se definen: x_{off} , cruce con la isóbata de 50 m, donde se lee la altura offshore η_{50} ; x_{ini_eje} , cruce del eje con la costa real, inicio del tramo en tierra donde se busca el MIH (segmento verde); y x_{on} , límite de inundación. x_{ini} es el punto de la costa muestreada más cercano al transecto, usado solo para la lectura puntual de la altura en la costa; por el corte de las esquinas puede quedar lateral al eje, y un tramo en tierra definido desde él (segmento rojo punteado) resulta diagonal y lee agua ajena al transecto. Elaboración propia.

3.4. Datum vertical y cálculo del MIH

Los campos de salida de las simulaciones NLSW reportan variables con referencias verticales distintas. En el mar entregan la elevación de la superficie libre sobre el nivel medio y, en tierra, la profundidad de la lámina de agua sobre el terreno. Para comparar alturas a lo largo de un transecto se construye una variable única de superficie de agua, sumando en tierra la elevación del terreno a la profundidad de la lámina y manteniendo intacta la elevación en el mar. Sin esta unificación, la superficie de agua queda “bajo el terreno” en costas elevadas y los factores se subestiman sistemáticamente.

El $MIH_{t,s}$ se calcula como el máximo de esa variable exclusivamente sobre el tramo en tierra del transecto, con dos consideraciones: se descarta lo que quede después de un hueco de datos sostenido (mayor a 150 m) y después de un tramo sostenido de agua permanente según la batimetría estática (mayor a 800 m), para evitar que lagunas y esteros interiores, que no son inundación del evento, contaminen el máximo. La Figura 3 esquematiza este último caso.

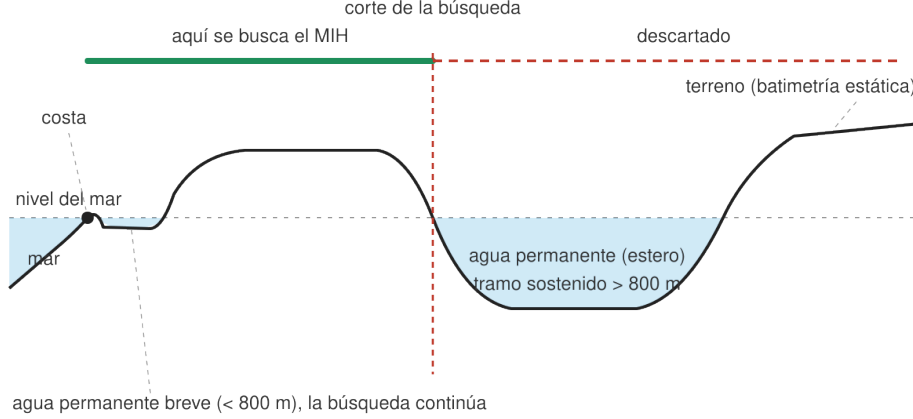


Figura 3: Salvaguarda de agua permanente en el cálculo del MIH, sobre el perfil esquemático de un transecto desde el mar hacia tierra adentro. El terreno corresponde a la batimetría estática, sin tsunami, y cada punto del transecto donde el terreno queda al nivel del mar o bajo él se marca como agua permanente. Los tramos breves de agua permanente cercanos a la costa (una playa o plataforma somera, de largo menor al umbral) son parte legítima de la zona inundable, por lo que la búsqueda continúa a través de ellos. Cuando aparece un tramo sostenido de agua permanente de largo mayor a 800 m, correspondiente a un estero o laguna interior y no a la costa misma, la búsqueda se corta al inicio de ese tramo y todo lo posterior se descarta (segmento rojo punteado), de modo que el MIH se evalúa solo en el tramo alcanzable desde la costa (segmento verde). Si ningún punto queda alcanzable, el par escenario–transecto se registra como no medible y se excluye. Elaboración propia.

3.5. Calibración y validación cruzada

La capacidad predictiva se evalúa con validación cruzada de 5 particiones sobre escenarios, estratificada por magnitud de momento. El factor $\tilde{F}_t$ de cada partición se calibra solo con sus escenarios de entrenamiento y se evalúa sobre los escenarios no vistos, comparando AH contra el MIH de la simulación NLSW. Para cada partición, sobre sus N pares escenario–transecto válidos de prueba (con $y_i = MIH_i$ el valor simulado e $\hat{y}_i = AH_i$ la predicción), se calculan el error absoluto medio,

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i| \quad (5)$$

la raíz del error cuadrático medio,

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (6)$$

el sesgo medio,

$$\text{sesgo} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i) \quad (7)$$

y el coeficiente de determinación,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

donde $\bar{y}$ es la media de los valores simulados de la partición. Las métricas reportadas son el promedio de las cinco particiones. Como línea base se usa la predicción sin factor ($\text{AH} = \eta_{50}$, equivalente a $\tilde{F}_t = 1$), evaluada con las mismas ecuaciones sobre los mismos pares, y como referencia teórica la ley de Green (Ecuación 4).

3.6. Incertidumbre del factor calibrado

Siguiendo a Glimsdal et al. (2019), se cuantifican: el sesgo normalizado por par escenario–transecto,

$$\varepsilon = \frac{\text{AH} - \text{MIH}}{\text{MIH}} \quad (9)$$

donde AH es la predicción fuera de muestra y MIH el valor simulado, y cuya desviación estándar sobre todos los pares se denota σ_ε ; la variabilidad espacial de cada escenario,

$$\sigma_i = \text{std}(\{\ln \text{MIH}_t\}_{t \in T_i}) \quad (10)$$

donde T_i es el conjunto de transectos con inundación medible del escenario i y std la desviación estándar muestral; y el ajuste de una distribución log-normal a la colección de σ_i de la localidad, equivalente a

$$\ln \sigma_i \sim \mathcal{N}(\mu_\sigma, s_\sigma^2) \quad (11)$$

del cual se definen la variabilidad espacial típica $\bar{\sigma} = e^{\mu_\sigma}$ (la mediana del ajuste) y su dispersión $\sigma_\sigma = s_\sigma$, que representa la incertidumbre sobre cuál σ_i aplica a un escenario nuevo. La incertidumbre epistémica total combina las tres fuentes, tratadas como independientes:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \bar{\sigma}^2 + \sigma_\sigma^2} \quad (12)$$

Cabe precisar que el sesgo ε difiere del de la Ecuación 3 de Glimsdal et al. (2019), que se evalúa por simulación comparando una altura amplificada por sitio contra la mediana del MIH del dominio, ya que allí el factor es un agregado por punto de interés (la mediana de un conjunto de perfiles). Aquí la calibración por transecto provee la correspondencia directa entre cada predicción y su valor simulado, lo que permite evaluar el sesgo par a par, una comparación más exigente. Como aplicación ilustrativa de esta caracterización, la distribución log-normal del factor calibrado se propaga por Monte Carlo a una curva de amenaza condicional $\Pr(\text{MIH} > z)$ dado un escenario de referencia, análoga a la Ecuación 5 de Glimsdal et al. (2019); esta curva no incorpora tasas de recurrencia sísmica, que quedan fuera del alcance del trabajo.

4. Datos y zona de estudio

El insumo del trabajo es un catálogo de simulaciones NLSW de alta resolución de escenarios sísmicos frente a la costa chilena, generadas con el modelo Tsunami-HySEA, validado en los ejercicios de benchmarking del NTHMP (Macías et al., 2020). El catálogo cubre magnitudes de momento entre 7.5 y 9.4 en 20 niveles (paso 0.1), con hasta 225 escenarios distintos por nivel, que difieren en la ubicación y en la distribución del deslizamiento de la ruptura, agrupados en tres familias según la profundidad de la fuente. Cada simulación entrega los campos de máximos (elevación de superficie libre en el mar y profundidad de lámina en tierra) sobre la grilla de la localidad; no se dispone de series de tiempo. La Tabla 1 lista las ocho localidades de estudio y el número de escenarios disponible en cada una. La aplicación del método requiere que el dominio de simulación contenga la isóbata de referencia. Como la profundidad adoptada (50 m) es una elección de configuración de este estudio y no una restricción del método, dominios que no la alcanzan podrían incorporarse recalibrando con una isóbata más somera.

Tabla 1: Localidades de estudio y escenarios NLSW disponibles.

Código	Localidad	Escenarios
arica	Arica	4488
iqui	Iquique	4488
anton	Antofagasta	4488
coqui	Coquimbo	4488
qtro	Quintero	4488
valp	Valparaíso	4322
sano	San Antonio	4488
talc	Talcahuano	1500

Una característica del catálogo condiciona el análisis. Los campos de altura están cuantizados en pasos de $1/1024$ m (≈ 1 mm), lo que define un piso de ruido relativo apreciable en los escenarios de magnitud baja ($\sim 2\%$ del factor en M_w 7.5, contra 0.02% en M_w 9.4).

5. Implementación computacional

El método se implementó como un paquete de Python (**tsamfapy**) que cubre el flujo completo: construcción de la geometría de transectos, carga de escenarios con el datum unificado, cálculo de factores, calibración, validación cruzada, análisis de incertidumbre, curva de amenaza y generación automática de las figuras del análisis. El paquete es portable (los datos entran por parámetro, sin rutas absolutas), cuenta con una suite de 27 pruebas unitarias y garantiza trazabilidad. Cada corrida registra su configuración completa, un identificador ordenable cronológicamente y el hash del código fuente en los metadatos del dataset resultante, del manifiesto JSON y de cada figura PNG. Todos los resultados reportados en este documento provienen de corridas oficiales identificadas por su hash de código; el Anexo A detalla las corridas y los comandos de reproducción.

6. Resultados

Los resultados se ilustran con Valparaíso como caso de referencia y se tabulan para las ocho localidades de estudio.

6.1. Geometría y factores calibrados

La geometría de transectos de Valparaíso se muestra en la Figura 4. En el perfil de un transecto representativo para un escenario de magnitud alta (Figura 5) se aprecia la amplificación del campo al acercarse a la costa, que el factor busca capturar. El factor calibrado resulta marcadamente local (Figura 6), con contrastes persistentes entre sectores de la misma bahía, lo que justifica la calibración por transecto en lugar de un factor único por localidad.

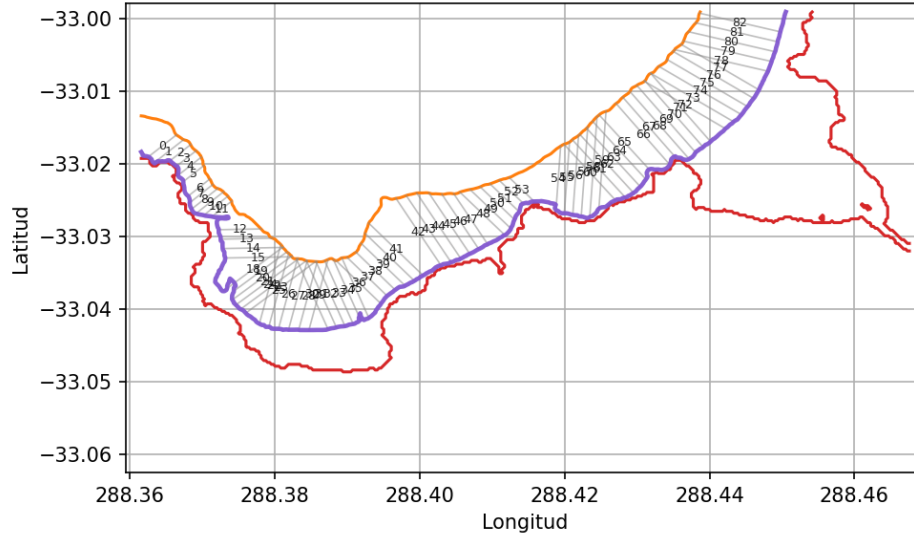


Figura 4: Transectos perpendiculares a la costa utilizados en el análisis de Valparaíso, sobre la batimetría de la zona. Elaboración propia.

6.2. Validación cruzada fuera de muestra

La Tabla 2 resume las métricas de la validación cruzada de 5 particiones para el factor de la Ecuación 2. El MAE fuera de muestra va de 0.35 m (San Antonio) a 0.71 m (Coquimbo), con R^2 entre 0.88 y 0.96. En todas las localidades el factor calibrado reduce el error de la línea base sin amplificación, con mejoras de entre 22 % (Valparaíso) y 59 % (Arica). El sesgo medio es levemente negativo (subestimación de hasta 0.47 m en Antofagasta), consistente con el carácter conservador de la mediana como estadístico de calibración frente a una distribución de factores con cola derecha.

La Figura 7 muestra la dispersión predicho-simulado de las predicciones fuera de muestra en Valparaíso: la nube se ordena en torno a la recta 1:1 en más de dos órdenes de magnitud de inundación, con el error absoluto mediano creciendo desde milímetros en magnitudes bajas a decenas de centímetros en $M_w > 9$. El histograma del error relativo de la misma figura exhibe una cola izquierda marcada: el 10.0 % de los pares subestima el MIH en más de 20 %, contra solo un 0.2 % que lo sobreestima en esa magnitud, lo que confirma que los errores grandes del método son mayoritariamente subestimaciones, en línea con el sesgo medio negativo de la Tabla 2. A nivel agregado, las distribuciones de la mediana de MIH por simulación y de su altura amplificada resultan consistentes (Figura 8), lo que indica que el método reproduce no solo el valor central sino la forma de la distribución de inundación del catálogo, tal como reportan Glimsdal et al. (2019) para la región NEAM.

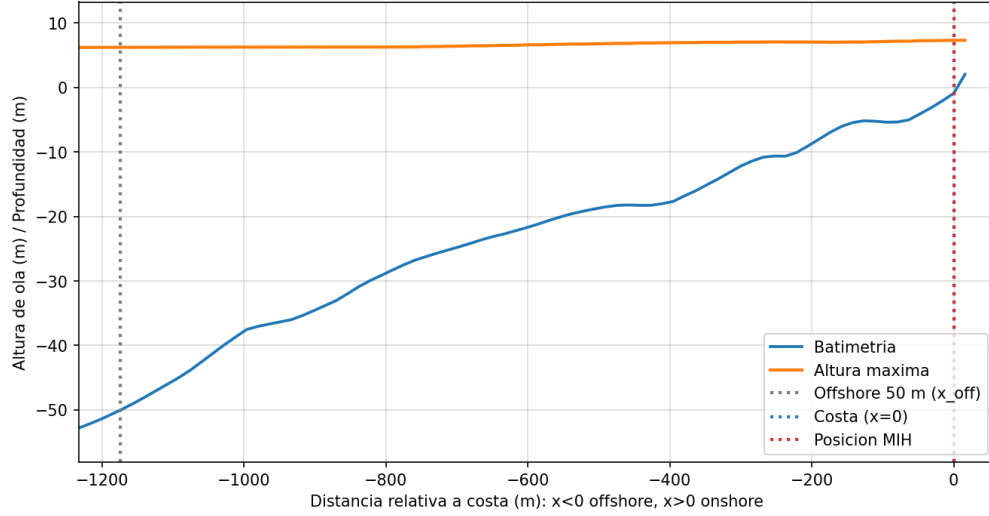


Figura 5: Perfil de altura máxima de ola y batimetría a lo largo de un transecto representativo de Valparaíso (M_w 9.4), desde el punto offshore en la isóbata de 50 m hasta el límite de inundación. Elaboración propia.

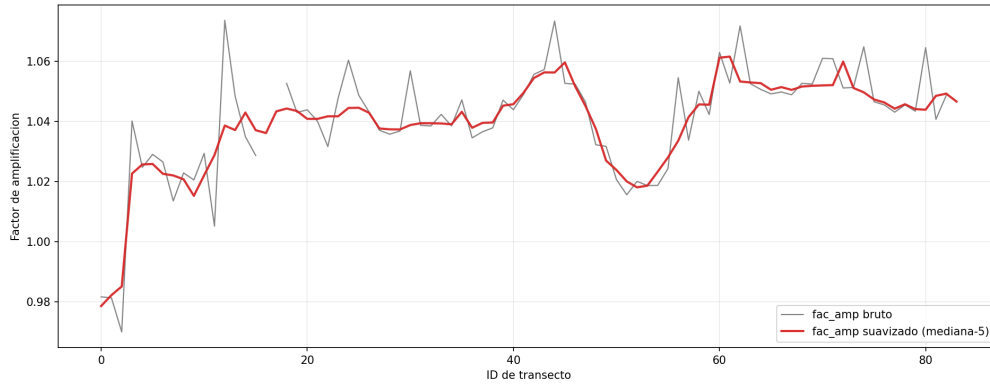


Figura 6: Factor de amplificación por transecto a lo largo de la costa de Valparaíso: valor bruto y suavizado con mediana móvil de cinco transectos. Elaboración propia.

Tabla 2: Validación cruzada fuera de muestra (5 particiones estratificadas por M_w) del factor calibrado, por localidad. La línea base es la predicción sin factor ($AH = \eta_{50}$).

Localidad	Escenarios	MAE (m)	RMSE (m)	R^2	MAE base (m)	Sesgo (m)
Arica	4488	0.498	1.414	0.956	1.201	-0.194
Iquique	4488	0.558	1.577	0.959	1.287	-0.209
Antofagasta	4488	0.578	1.579	0.942	0.867	-0.471
Coquimbo	4488	0.706	2.187	0.898	1.256	+0.006
Quintero	4488	0.499	1.280	0.952	0.956	-0.283
Valparaíso	4322	0.404	1.260	0.949	0.516	-0.334
San Antonio	4488	0.350	1.151	0.918	0.457	-0.275
Talcahuano	1500	0.461	1.448	0.877	0.682	-0.179

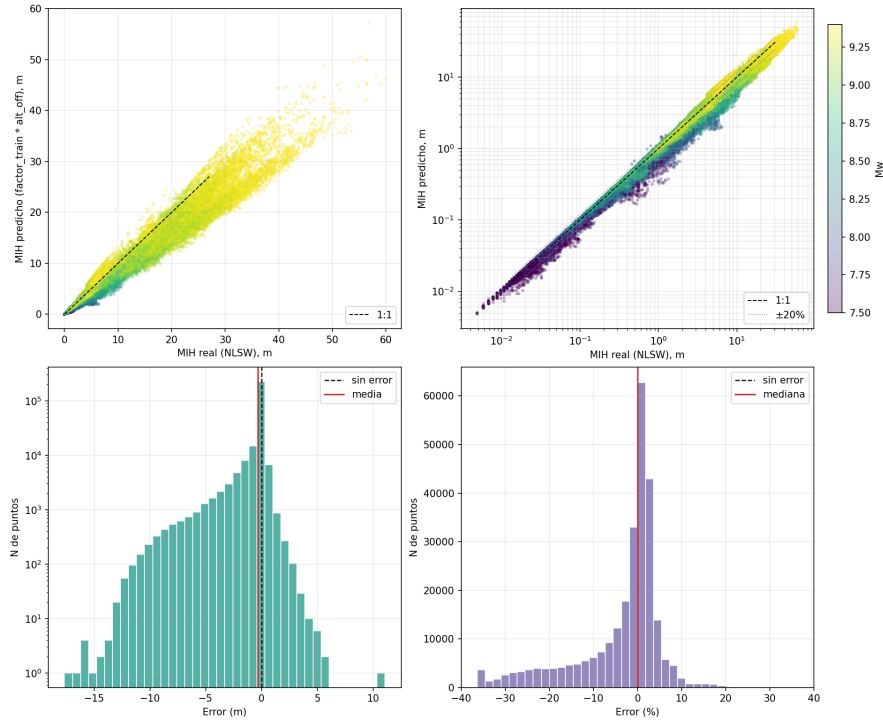


Figura 7: Validación cruzada fuera de muestra en Valparaíso: MIH predicho por el factor calibrado (con escenarios de entrenamiento ajenos al evaluado) frente al MIH de la simulación NLSW. Elaboración propia.

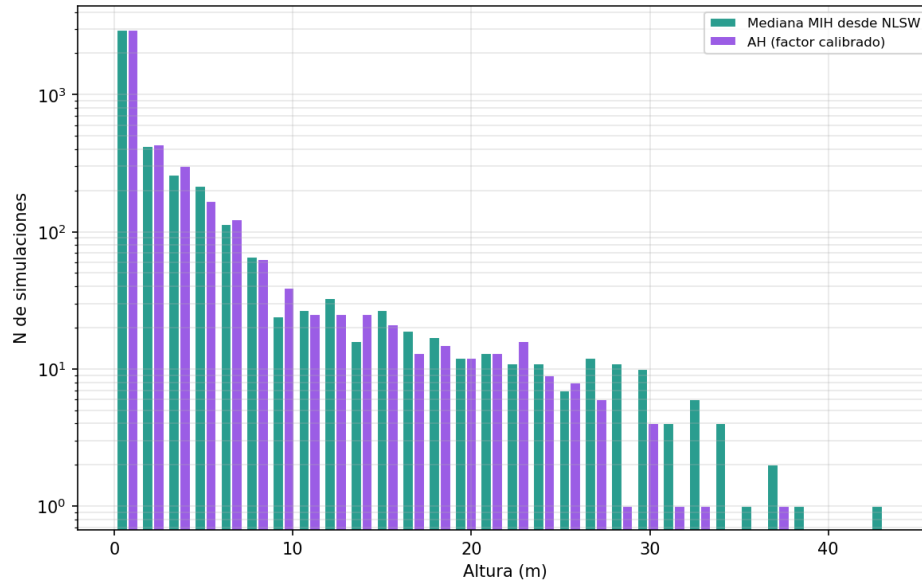


Figura 8: Distribución de la mediana de MIH por simulación (ajuste log-normal entre transectos) frente a la de la altura amplificada correspondiente, agregando todas las simulaciones de Valparaíso. Elaboración propia.

6.3. Comparación con la ley de Green

La predicción de la ley de Green se construye aplicando el factor teórico de la Ecuación 4 a la misma altura offshore que usa el método calibrado:

$$AH_{t,s}^G = A_G \eta_{50} \approx 3.16 \eta_{50} \quad (13)$$

donde $AH_{t,s}^G$ es la estimación de $MIH_{t,s}$ según la ley de Green. Al ser una fórmula fija, no requiere calibración; para que la comparación sea directa, se evalúa sobre los mismos pares escenario–trayecto fuera de muestra de la validación cruzada, con las mismas métricas (Ecuaciones 5 a 8) y el mismo sesgo normalizado (Ecuación 9, reemplazando AH por AH^G).

La Tabla 3 incluye el desempeño resultante. El factor fijo $A_G \approx 3.16$ sobreestima sistemáticamente la inundación. Los errores medios van de 2.5 a 4.8 m y el R^2 es negativo en las ocho localidades (hasta -1.92 en Valparaíso), es decir, predice peor que la propia altura offshore sin amplificar. En Valparaíso el sesgo normalizado medio de Green es $+1.89$ (sobreestimación cercana al 190 %), mientras que el del factor calibrado es -0.038 con desviación estándar 0.102 (Figura 9). Este contraste, coherente con lo reportado por Glinsdal et al. (2019), confirma que la amplificación costera efectiva depende de la morfología local y no puede representarse con un exponente teórico único.

6.4. Incertidumbre del factor calibrado

La Tabla 3 resume las componentes de incertidumbre por localidad. La variabilidad espacial mediana σ_i va de 0.08 (Valparaíso) a 0.93 (Talcahuano), y su distribución se muestra en la Figura 10 para Valparaíso. La incertidumbre total σ_{RMS} (Ecuación 12) resulta entre 0.38 y 1.37. Ese rango contiene tanto el valor de referencia de Glinsdal et al. (2019) (0.55, incertidumbre asociada al proceso de inundación, cuantificada a partir de simulaciones) como la incertidumbre total de 0.92 que ese mismo trabajo reporta desde Davies et al. (2018), obtenida al comparar resultados de PTHA con observaciones de eventos pasados. Como aplicación ilustrativa del factor calibrado y su incertidumbre, la curva de amenaza condicional de Valparaíso (Figura 11) muestra cómo la incertidumbre epistémica se traduce en el ancho de las bandas de probabilidad de excedencia dado el escenario. Al ser condicional a su ocurrencia, la curva no incorpora tasas de recurrencia sísmica.

Tabla 3: Incertidumbre del método y desempeño de la ley de Green por localidad: variabilidad espacial mediana (σ_i), incertidumbre total (σ_{RMS}), desviación estándar del sesgo normalizado (σ_ϵ), y MAE y R^2 de la ley de Green sobre las mismas predicciones fuera de muestra.

Localidad	σ_i med.	σ_{RMS}	σ_ϵ	Green MAE (m)	Green R^2
Arica	0.192	0.409	0.197	3.09	-0.32
Iquique	0.184	1.367	0.253	3.21	-0.16
Antofagasta	0.151	0.382	0.153	4.55	-1.13
Coquimbo	0.404	0.540	0.224	3.12	-0.23
Quintero	0.116	0.805	0.185	3.44	-0.50
Valparaíso	0.079	0.583	0.102	4.83	-1.92
San Antonio	0.270	0.412	0.136	2.80	-0.92
Talcahuano	0.932	0.953	0.221	2.51	-0.45

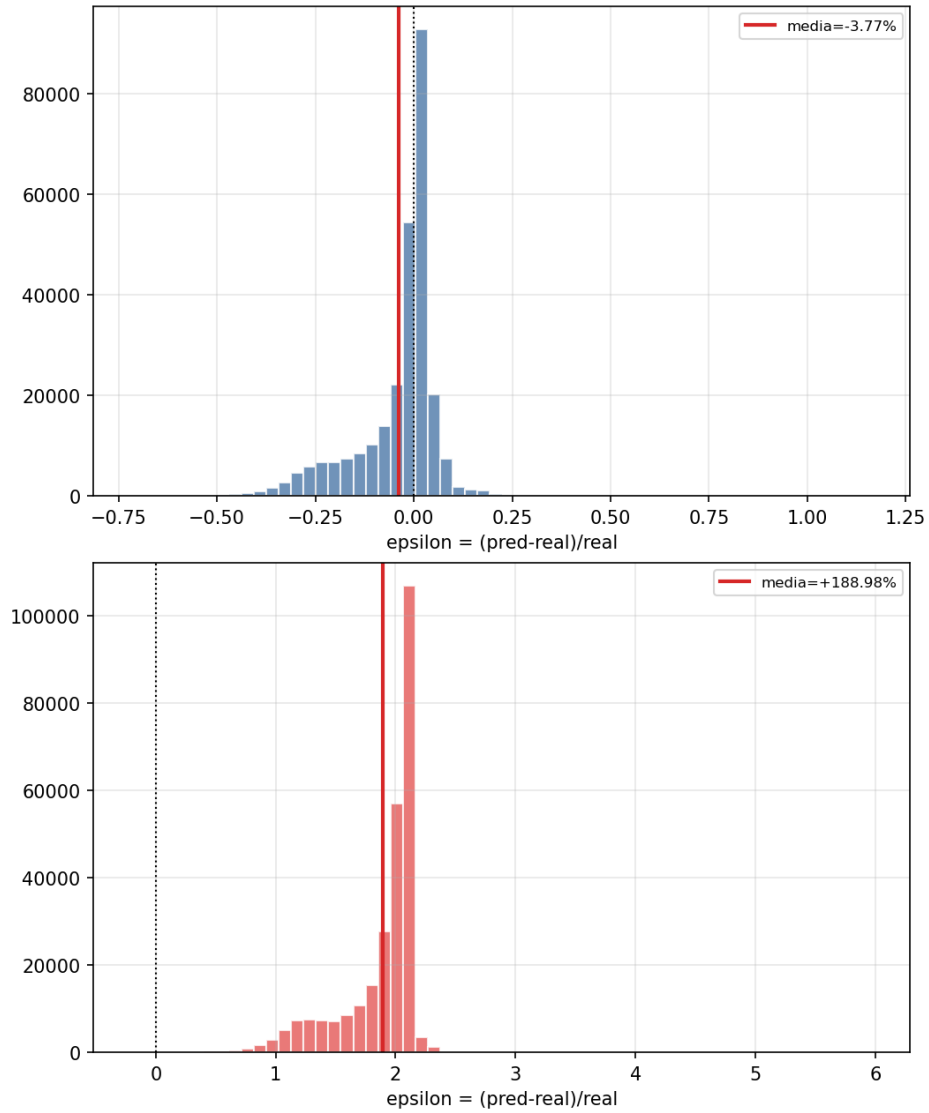


Figura 9: Distribución del sesgo normalizado ϵ del modelo local calibrado (panel superior) y de la ley de Green (panel inferior), sobre las mismas predicciones fuera de muestra en Valparaíso. Elaboración propia.

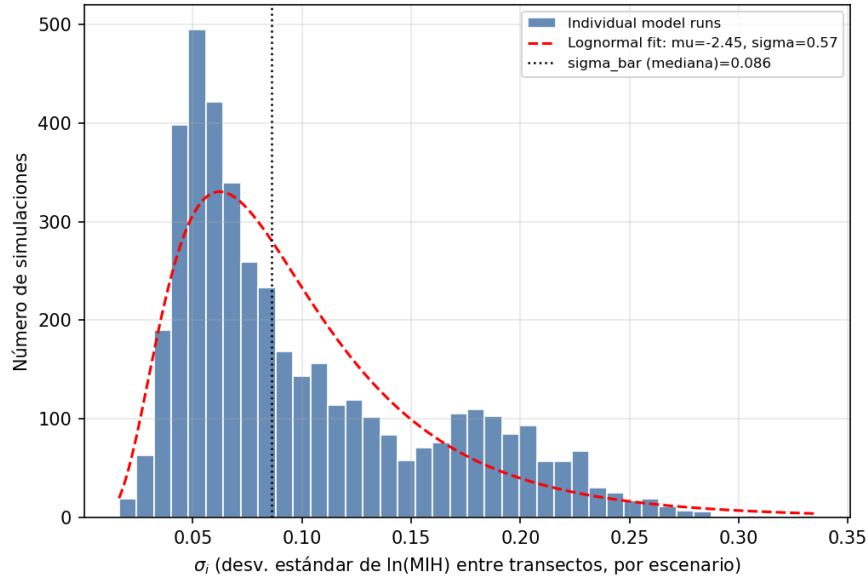


Figura 10: Distribución de la variabilidad espacial σ_i (desviación estándar de $\ln(\text{MIH})$ entre los transectos de un mismo escenario) en Valparaíso, con ajuste log-normal. La línea vertical marca la mediana del ajuste ($\bar{\sigma} = 0.086$), que es la componente que entra en la Ecuación 12 y difiere levemente de la mediana empírica de σ_i reportada en la Tabla 3 (0.079). Elaboración propia.

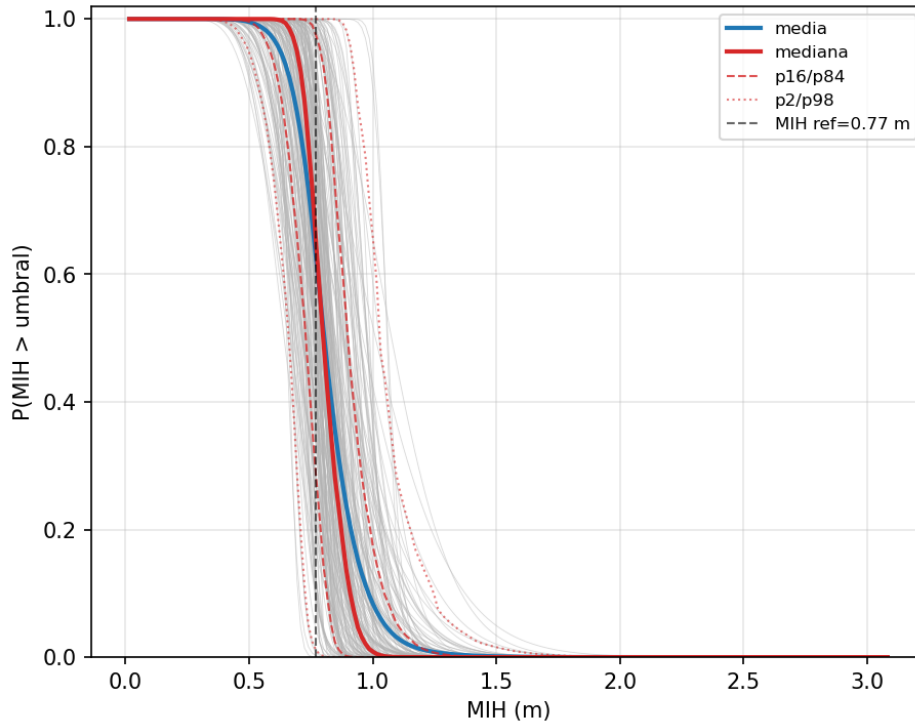


Figura 11: Curva de amenaza condicional $\Pr(\text{MIH} > z)$ para Valparaíso, propagando la incertidumbre epistémica del factor por Monte Carlo: curvas individuales, media, mediana y bandas de percentiles 16–84 y 2–98. Elaboración propia.

6.5. Contraste de desempeño entre localidades

El MAE absoluto de la Tabla 2 depende de la escala de inundación de cada localidad, por lo que la identificación del mejor y el peor caso se hace con métricas relativas, calculadas directamente sobre las predicciones fuera de muestra de la validación cruzada. Bajo ese criterio el mejor caso es Valparaíso y el peor es Coquimbo; la Tabla 4 los compara. Talcahuano, cuya cobertura de transectos con factor válido es sustancialmente menor, se discute por separado al final de esta sección como caso límite de aplicabilidad del método.

Tabla 4: Comparación del mejor caso (Valparaíso) y el peor caso (Coquimbo). Métricas de error calculadas sobre las predicciones fuera de muestra de la validación cruzada (Ecuaciones 5 a 8); estadísticos del factor sobre la mediana de $F_{t,s}$ por transecto.

Métrica	Valparaíso	Coquimbo
MAE fuera de muestra (m)	0.404	0.706
RMSE fuera de muestra (m)	1.260	2.187
MAE relativo (%)	13.6	21.6
Error relativo mediano (%)	2.9	13.4
Pares dentro de $\pm 20\%$ (%)	89.8	63.8
R^2	0.949	0.898
Transectos con factor válido	81/84 (96 %)	173/228 (76 %)
Factor mediano (p10–p90)	1.05 (1.02–1.15)	1.65 (1.04–2.19)
ε mediano por M_w	0.00 a +0.03	−0.16 a +0.07
σ_i mediana	0.079	0.404
σ_{RMS} (σ_ε ; $\bar{\sigma}$; σ_σ)	0.58 (0.05; 0.09; 0.57)	0.50 (0.07; 0.37; 0.32)

En Valparaíso el método alcanza su mejor desempeño del conjunto. El 96 % de los transectos tiene factor válido, los factores calibrados son homogéneos a lo largo de la costa (p10–p90 de 1.02 a 1.15, Figura 6) y el sesgo normalizado mediano queda centrado en todo el rango de magnitudes ($|\varepsilon| \leq 0.03$). El error relativo mediano fuera de muestra es de 2.9 % y el 89.8 % de los pares queda dentro de $\pm 20\%$ del MIH simulado.

En Coquimbo el método conserva un R^2 alto (0.898) pero comete los mayores errores del conjunto en términos absolutos (RMSE de 2.19 m) y relativos (MAE relativo de 21.6 %; solo el 63.8 % de los pares queda dentro de $\pm 20\%$). Dos rasgos de la localidad lo explican. Primero, la amplificación es alta y fuertemente heterogénea a lo largo de la costa. El factor mediano por transecto es 1.65 con un rango p10–p90 de 1.04 a 2.19 (Figura 13), el doble de dispersión que en Valparaíso, consistente con su variabilidad espacial σ_i cinco veces mayor. Segundo, el sesgo normalizado depende de la magnitud. Bajo M_w 8.5 los violines de la Figura 14 se ubican bajo la referencia cero, con medianas entre −0.16 y −0.08, es decir, el método subestima sistemáticamente la inundación de los escenarios menores. La mediana cruza el cero en torno a M_w 9.0 y llega a +0.07 en M_w 9.4, una sobreestimación leve de los escenarios mayores. La dispersión entre los percentiles 16 y 84 se angosta con la magnitud, de 0.41 en M_w 7.5 a 0.29 en M_w 9.4, aunque de forma asimétrica, pues la cola inferior se contrae mientras la superior crece. Este comportamiento confirma que la amplificación efectiva decrece con el tamaño de la ola incidente y que un único factor mediano por transecto, al ser un compromiso entre ambos regímenes, no captura esa dependencia. El sesgo medio en metros resulta casi nulo (+0.006 m, Tabla 2) precisamente porque ambos regímenes se compensan. La dispersión fuera de

muestra (Figura 12) refleja lo mismo. Mientras en Valparaíso los errores relativos grandes son casi exclusivamente subestimaciones (10.0 % de los pares bajo -20 % contra 0.2 % sobre $+20$ %), en Coquimbo las dos colas son anchas (19.7 % y 16.5 %, respectivamente).

Cabe notar que la mayor σ_{RMS} del conjunto no es la de Coquimbo sino la de Iquique (1.35, Tabla 3), pero por un mecanismo distinto: allí domina la componente de variabilidad espacial ($\sigma_\sigma = 1.33$, una cola de escenarios con dispersión extrema entre transectos), mientras la predicción del factor es la de mejor R^2 del conjunto (0.959). Es decir, en Iquique la incertidumbre proviene de la variabilidad de la inundación entre transectos vecinos y no del error del factor calibrado.

Talcahuano como caso límite de aplicabilidad. En Talcahuano solo el 51 % de los transectos (232 de 456) tiene un factor calculable, de modo que sus métricas de validación son condicionales a esa cobertura parcial y no son directamente comparables con las de las demás localidades. La causa es la referencia offshore y no la inundación: 216 de los 224 transectos sin factor no cruzan la isóbata de 50 m a lo largo de su propio rayo, porque el interior de la bahía es más somero que esa profundidad. Los factores válidos son fuertemente heterogéneos (p10–p90 de 1.02 a 1.84, Figura 15), con un 7.8 % de transectos con factor menor que 1 asociado a los cuerpos de agua permanentes, y el sesgo normalizado también depende de la magnitud (ε mediano de $+0.28$ a $+0.78$). La baja cobertura es en sí misma un resultado: el método exige que el dominio contenga la isóbata de referencia frente a cada transecto, condición que el interior de una bahía somera no cumple. La variabilidad espacial (σ_i mediana de 0.93, la mayor del conjunto) domina su incertidumbre ($\bar{\sigma} = 0.90$ de un $\sigma_{RMS} = 0.95$). El paquete implementa una exclusión reversible de los transectos con factor persistentemente bajo, cuya aplicación a Talcahuano queda como decisión declarable en usos posteriores del factor calibrado.

7. Discusión

7.1. Comparación con el estudio de referencia

El desempeño obtenido en Chile es consistente con el reportado para la región NEAM. El sesgo normalizado del método calibrado es aproximadamente centrado ($|\bar{\varepsilon}| \approx 0.04$ en Valparaíso) con dispersión moderada, la distribución de MIH entre transectos es consistente con el modelo log-normal adoptado, cuya mediana es la que el factor busca predecir (Figura 8), y la ley de Green resulta fuertemente sesgada hacia la sobreestimación. La incertidumbre total σ_{RMS} por localidad (0.38–1.37) acota el valor único de 0.55 de Glimsdal et al. (2019) y el 0.92 de Davies et al. (2018, como se citó en Glimsdal et al., 2019), lo que sugiere que un valor regional único es insuficiente para Chile, pues localidades como Iquique y Talcahuano exhiben incertidumbres del doble o más que las demás.

7.2. Mecanismos observados

Cuatro mecanismos, todos derivados de las alturas de ola en mar y tierra del propio catálogo, explican gran parte de la estructura de los factores:

1. **Datum vertical.** La unificación de referencias verticales entre mar y tierra es la decisión de mayor impacto individual; sin ella los factores se subestiman de forma severa en costa elevada (en el caso de referencia de Valparaíso, el factor pasa de 0.33 a 1.17 al corregirla).

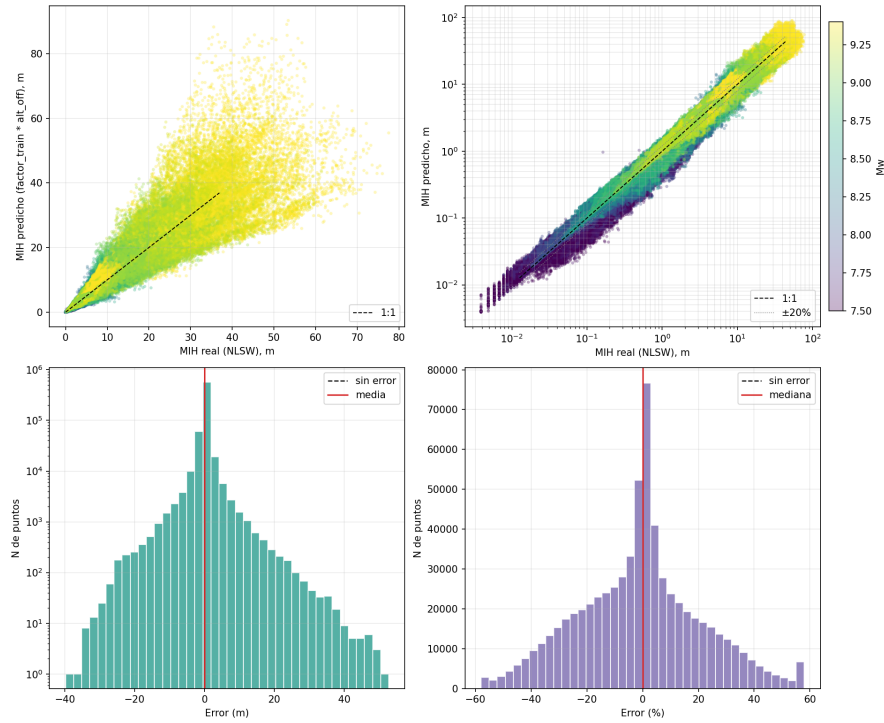


Figura 12: Validación cruzada fuera de muestra en Coquimbo: MIH predicho por el factor calibrado (con escenarios de entrenamiento ajenos al evaluado) frente al MIH de la simulación NLSW. A diferencia de Valparaíso (Figura 7), donde el histograma del error relativo exhibe una cola izquierda de subestimación, aquí resulta aproximadamente simétrico y con colas más anchas en ambos sentidos. Elaboración propia.

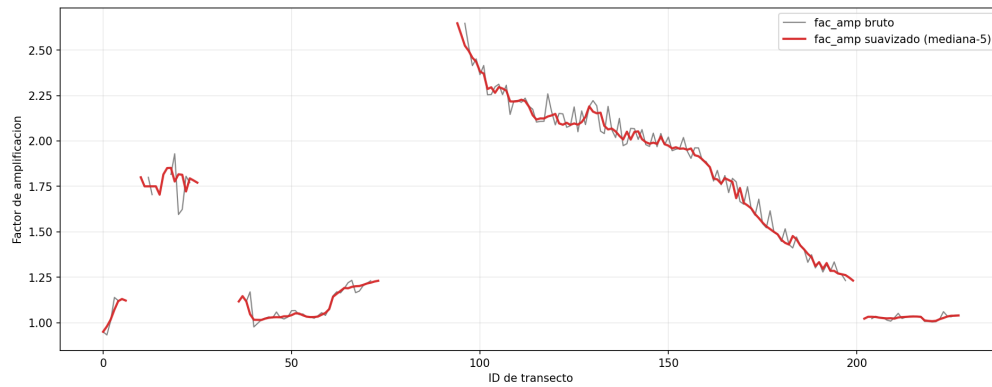


Figura 13: Factor de amplificación por transecto a lo largo de la costa de Coquimbo: valor bruto y suavizado con mediana móvil de cinco transectos; los tramos sin dato corresponden a transectos sin factor válido (24 % del total). El rango de factores es notoriamente más amplio que el de Valparaíso (Figura 6). Elaboración propia.

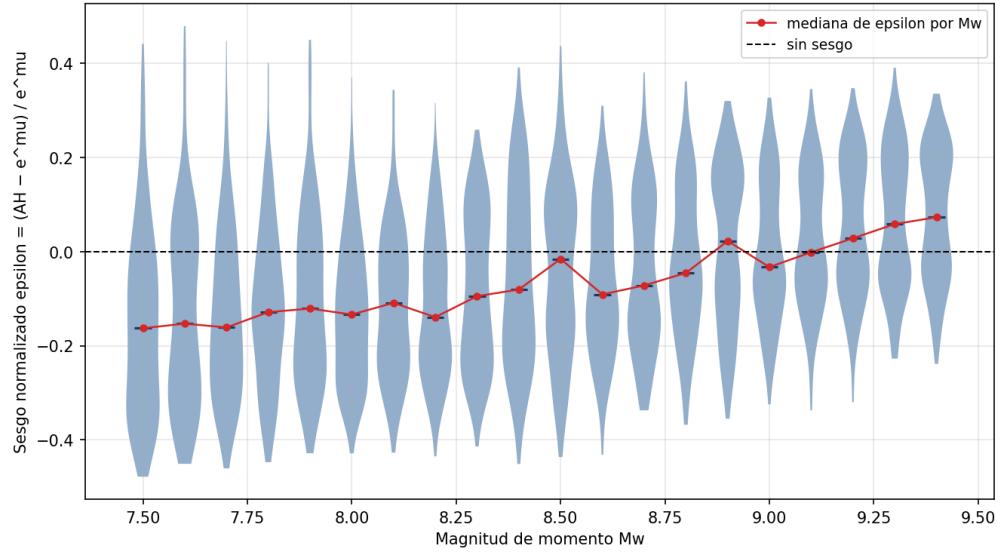


Figura 14: Distribución del sesgo normalizado ε del método AF en Coquimbo, estratificada por magnitud de momento: un violín por nivel de M_w con la mediana de ε por nivel. Elaboración propia.

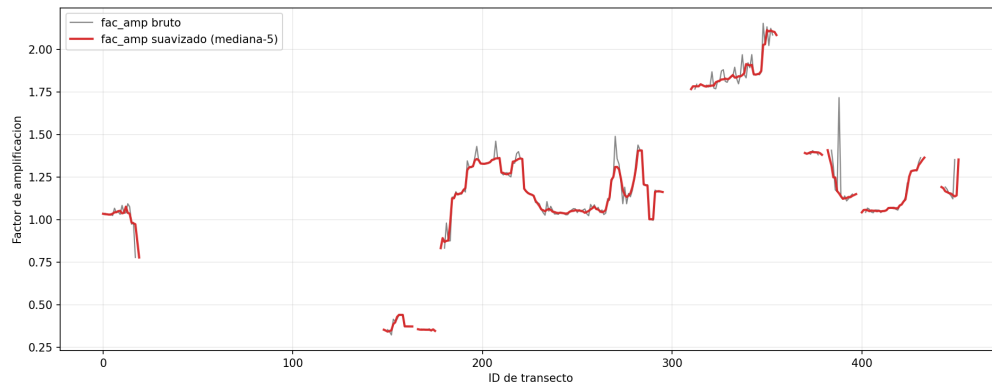


Figura 15: Factor de amplificación por transecto a lo largo de la costa de Talcahuano: valor bruto y suavizado con mediana móvil de cinco transectos; los tramos sin dato corresponden a transectos sin factor válido (49 % del total). Elaboración propia.

2. **Dependencia de la amplificación con la magnitud.** En Coquimbo el sesgo normalizado mediano decrece monótonamente con M_w (de -0.16 a $+0.07$, Figura 14), lo que indica que la amplificación efectiva disminuye con el tamaño de la ola incidente y que un factor único por transecto es un compromiso entre regímenes (Sección 6.5).
3. **Cuerpos de agua permanentes.** En Talcahuano, los transectos que atraviesan cuerpos de agua permanentes extensos, detectados directamente sobre la batimetría estática (Figura 3), concentran los factores menores que 1 y la mitad de los transectos no registra inundación medible; la variabilidad espacial resultante (σ_i mediana de 0.93, la mayor del conjunto) domina su incertidumbre y degrada la aplicabilidad del método por transecto (Sección 6.5).
4. **Convergencia de transectos en costas cóncavas.** En Valparaíso, donde la curvatura de la costa es cóncava (Figura 4), una fracción alta de transectos converge hacia los mismos sectores de la bahía, por lo que aumentar su densidad no agrega información espacial (la variabilidad σ_i es insensible al número de transectos por segmento entre 3 y 24).

7.3. Limitaciones

Las limitaciones principales del estudio son: (I) el catálogo entrega solo campos de máximos, por lo que no se implementan las componentes del método que dependen de la polaridad y el período de la onda incidente, que en Glimsdal et al. (2019) se derivan de series de tiempo y de un simulador lineal propio; (II) la cuantización de los datos de origen (≈ 1 mm) impone un piso de ruido relevante en magnitudes bajas; y (III) la aplicabilidad del método queda condicionada a que el dominio de simulación contenga la isóbata de referencia adoptada (50 m); evaluar isóbatas más someras que permitan cubrir dominios costeros de menor extensión se propone como trabajo futuro.

Conclusiones

Se implementó y validó en la costa de Chile el método de factores de amplificación de Glimsdal et al. (2019) para estimar la máxima altura de inundación por tsunami desde la altura de ola en la isóbata de 50 m. Sobre un catálogo de hasta 4488 simulaciones NSW por localidad (M_w 7.5–9.4), el factor calibrado por transecto predice la inundación fuera de muestra con errores absolutos medios de 0.35 a 0.71 m y R^2 de 0.88 a 0.96 en las ocho localidades de estudio, reduciendo el error de la línea base sin amplificación entre 22 % y 59 %. La ley de Green, en cambio, sobreestima sistemáticamente la inundación (errores medios de 2.5 a 4.8 m y R^2 negativo), lo que descarta su uso directo como estimador de inundación en estas costas.

La incertidumbre epistémica total del factor (σ_{RMS} entre 0.35 y 1.35 según la localidad) es comparable con los valores de la literatura, pero su variabilidad entre localidades indica que debe cuantificarse localmente y no adoptarse como constante regional. El factor calibrado y su incertidumbre quedan disponibles como insumo directo para un futuro análisis probabilístico de amenaza; su propagación a una curva de amenaza condicional se ilustró para el caso de Valparaíso.

El método demostró ser sensible a decisiones de implementación que Glimsdal et al. (2019) no explicitan, en particular la unificación del datum vertical entre mar y tierra, la restricción de la búsqueda del máximo al tramo en tierra colineal al eje del transecto y el tratamiento de cuerpos de agua permanentes; estas decisiones quedaron documentadas y automatizadas en un paquete

computacional reproducible con trazabilidad completa de configuración y código. En conjunto, los resultados confirman que el método AF es una alternativa viable y económica a la simulación NLSW exhaustiva para la estimación regional de inundación por tsunami en Chile.

Referencias bibliográficas

- Behrens, J., Løvholt, F., Jalayer, F., Lorito, S., Salgado-Gálvez, M. A., Sørensen, M., Abadie, S., Aguirre-Ayerbe, I., Aniel-Quiroga, I., Babeyko, A., et al. (2021). Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: A review of research gaps. *Frontiers in Earth Science*, *9*, 628772. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.628772>
- Glimsdal, S., Løvholt, F., Harbitz, C. B., Romano, F., Lorito, S., Orefice, S., Brizuela, B., Selva, J., Hoechner, A., Volpe, M., Babeyko, A., Tonini, R., Wronna, M., & Omira, R. (2019). A new approximate method for quantifying tsunami maximum inundation height probability. *Pure and Applied Geophysics*, *176*, 3227-3246. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02091-w>
- Green, G. (1838). On the motion of waves in a variable canal of small depth and width. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, *6*, 457-462.
- León Canales, J., Vicuña del Río, M., & Gubler, A. (2019). Increasing tsunami risk through intensive urban densification in metropolitan areas: A longitudinal analysis in Viña del Mar, Chile. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *41*, 101312. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101312>
- Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Zamora, N., Nadim, F., Peduzzi, P., Dao, H., & Smebye, H. (2012). Tsunami hazard and exposure on the global scale. *Earth-Science Reviews*, *110*(1), 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.10.002>
- Macías, J., Mercado, A., González-Vida, J. M., Ortega, S., & Castro, M. J. (2020). Performance benchmarking of Tsunami-HySEA model for NTHMP's inundation mapping activities. *Pure and Applied Geophysics*, *177*(2), 1197-1223. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02415-w>
- Madariaga, R. (1998). Sismicidad de Chile. *Física de la Tierra*, *10*.

Anexo A. Reproducibilidad

Los resultados de este documento provienen de las corridas oficiales del 17 de julio de 2026, generadas con el paquete `tsamfapy` (hash de código `9eff9236a0`), salvo la Tabla 3 y la Figura 11, recalculadas con la corrida del 14 de agosto de 2026 (hash `2a19904bcb`), que evalúa el sesgo normalizado fuera de muestra. Cada corrida deja en su carpeta de resultados el dataset NetCDF de factores, el manifiesto JSON con la configuración y las métricas, las predicciones fuera de muestra de la validación cruzada y las figuras con sus leyendas; el hash del código y la configuración quedan incrustados también en los metadatos de cada figura PNG. El análisis completo de una localidad se reproduce con:

```
# desde la raiz del paquete tsamfapy_project/  
python ejemplos/correr_analisis_localidades.py <ruta_datos> valp  
  
# suite de pruebas unitarias (27 tests)  
python -m unittest discover -s tests -t .
```

Código programa 1: Comandos de reproducción del análisis de una localidad y de la suite de pruebas.