

Cuaderno reproducible

Simulación del Tsunami de Tumaco de 1979 [Piloto, sin validar]

Subdirección para el Conocimiento del Riesgo

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres

Cuaderno 3 — Visualización y validación:

RESUMEN

El 12 de diciembre de 1979, un terremoto de magnitud Mw 8.2 en la zona de subducción Nazca–Suramérica generó un tsunami destructivo que afectó la costa del Pacífico colombiano, en particular la ciudad de Tumaco (Nariño), donde se registraron alturas de run-up de hasta 5 metros y aproximadamente 450–600 víctimas mortales [Herd et al. \(1981\)](#). Este trabajo presenta una simulación numérica reproducible de la propagación de ese tsunami a escala regional, implementada en tres cuadernos de Google Colab ejecutables en CPU estándar sin infraestructura local. La simulación resuelve las ecuaciones de aguas someras linealizadas (LSWE) bidimensionales mediante un esquema de Lax-Friedrichs, y usa un modelo de N-wave tipo Carrier [Carrier et al. \(2003\)](#) para inicializar las condiciones de la superficie del agua. La batimetría y topografía del dominio de cálculo se construyen combinando datos GEBCO 2023 [GEBCO Compilation Group \(2023\)](#) y SRTM GL1 (30 m), reproyectados al sistema UTM Zona 18N. El flujo de trabajo completo —desde la preparación del DEM hasta la visualización de inundaciones máximas— está estructurado en tres cuadernos Jupyter encadenados y es reproducible sin infraestructura local.

INTRODUCCIÓN

Contexto sísmico del Pacífico colombiano

La costa del Pacífico colombiano se ubica sobre la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Suramericana, uno de los entornos tsunamigénicos más activos del mundo [Satake \(2014\)](#). La convergencia entre ambas placas ocurre a una tasa de aproximadamente 55–65 mm/año en dirección NE, generando ciclos sísmicos de alta magnitud que producen terremotos tipo *megathrust* capaces de generar tsunamis en todo el Pacífico [Kanamori & McNally \(1982\)](#).

El segmento colombiano de esta subducción ha producido eventos históricos significativos, entre ellos el terremoto de Esmeraldas de 1906 (Mw $\approx$ 8.8), el mayor evento sísmico del siglo XX en el área, y el terremoto de Tumaco de 1979 (Mw 8.2), objeto de este estudio [Herd et al. \(1981\)](#). La ciudad de Tumaco, con más de 200 000 habitantes y localizada a escasos metros sobre el nivel del mar en un archipiélago de islas bajas, es reconocida como una de las localidades con mayor riesgo tsunamigénico del continente americano [Servicio Geológico Colombiano \(2023\)](#).

El terremoto y tsunami del 12 de diciembre de 1979

El terremoto del 12 de diciembre de 1979 tuvo su epicentro aproximadamente en 1.598°N, 79.359°W, a unos 60 km al oeste de la costa de Tumaco, con una profundidad hipocentral de 33 km ([Herd et al., 1981](#)). La ruptura se propagó a lo largo de $\sim$ 250 km del plano de subducción con un mecanismo de falla inversa (thrust), generando deformación vertical del fondo oceánico de 0.5 a 2 metros.

El tsunami resultante llegó a Tumaco aproximadamente 15 minutos después del sismo, con alturas de run-up de 3–5 m en el área urbana. Las víctimas fatales fueron principalmente residentes de zonas bajas de las islas El Morro y La Viciosa, donde la inundación superó los 4 metros de altura [Herd et al. \(1981\)](#). Este evento motivó el establecimiento posterior del Sistema Nacional de Alerta por Tsunamis en Colombia.

Objetivo y alcance

Este cuaderno reproducible tiene tres objetivos:

1. **Demostrar** que la simulación de tsunamis históricos con código científico de referencia puede ejecutarse gratuitamente en Google Colab en CPU, sin infraestructura local.
2. **Calibrar** un modelo simplificado de N-wave para el evento de 1979, contrastando los resultados con las observaciones históricas de run-up.

3. **Proveer** un flujo de trabajo reproducible y documentado que pueda adaptarse a otros escenarios tsunamigénicos del Pacífico colombiano.

METODOLOGÍA

Modelo numérico: LSWE con Lax-Friedrichs

El modelo utilizado resuelve las **ecuaciones de aguas someras linealizadas** (LSWE, *Linearized Shallow Water Equations*) en forma bidimensional. A diferencia de las NSWE no lineales, la linealización en torno a la profundidad en reposo $H_0(x)$ permite un esquema bien-balanceado por construcción: el estado de reposo ($\eta = 0$, $u = v = 0$) es solución estacionaria exacta para cualquier fondo batimétrico. Las ecuaciones son:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (H_0 u)}{\partial x} + \frac{\partial (H_0 v)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{gn^2}{H_0^{4/3}} |u| u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{gn^2}{H_0^{4/3}} |v| v$$

donde η es la perturbación de la superficie libre respecto al nivel de reposo, u y v son las velocidades horizontales promediadas en la vertical, H_0 es la profundidad en reposo (fija durante la simulación), $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ y n es el coeficiente de Manning.

La discretización espacial utiliza el esquema de **Lax-Friedrichs 2D**: cada celda interior se actualiza como el promedio de sus cuatro vecinos (norte, sur, este, oeste) menos la divergencia del flujo centrada en el tiempo. Las celdas terrestres ($H_0 = 0$) actúan como paredes rígidas sin intercambio de masa o momento. La condición de borde exterior es de tipo Neumann (gradiente nulo). El solver está implementado en **NumPy puro** y se ejecuta en CPU estándar de Google Colab sin dependencias especiales.

Dominio de simulación y datos de entrada

El dominio abarca la región costera del Pacífico colombiano entre:

- Latitud: $0.5^\circ\text{N} - 3.5^\circ\text{N}$
- Longitud: $79.5^\circ\text{W} - 77.0^\circ\text{W}$

La batimetría y topografía se construyen a partir de datos **GEBCO 2023** (resolución 15 arco-segundos $\approx 450 \text{ m}$), reproyectados al sistema UTM Zona 18N para obtener unidades métricas. Para el modelado de zonas costeras e inundación, se incluye la topografía terrestre de Tumaco a partir de datos SRTM GL1 (30 m).

Condiciones iniciales: N-wave tipo Carrier

Las condiciones iniciales de la superficie del agua se representan mediante una N-wave bidimensional de doble Gaussiana, parametrización propuesta por [Carrier et al. \(2003\)](#) y ampliamente usada en simulaciones de tsunamis de subducción:

$$\eta(y) = 2 \left[A_1 e^{-k_1(y-y_1)^2} - A_2 e^{-k_2(y-y_2)^2} \right]$$

donde:

- $A_1 = 8.0 \text{ m}$ es la amplitud de calibración de la elevación principal
- $A_2 = A_1/3 \approx 2.67 \text{ m}$ es la amplitud de la depresión secundaria (*leading depression*)
- $\lambda = 80000 \text{ m}$ es la longitud de onda característica
- $k_1 = 28.416/\lambda^2$, $k_2 = 256/\lambda^2$ (constantes de la N-wave)
- y_1 es la posición del pico de elevación (núcleo de la falla, $\sim 60 \text{ km}$ de la costa)
- $y_2 > y_1$ es la posición de la depresión (cara frontal de la ola)

El valor $A_1 = 8.0 \text{ m}$ es un parámetro de calibración: la difusión numérica del esquema Lax-Friedrichs atenúa la ola aproximadamente $4\times$ durante los $\sim 60 \text{ km}$ de propagación hasta la costa, de modo que la amplitud costero-simulada alcanza los 3–5 m observados por [Herd et al. \(1981\)](#).

Parámetros de la simulación

Parámetro	Valor	Justificación
Resolución espacial	450 m	GEBCO 15 arc-sec en UTM
Paso de tiempo (dt)	1.0 s	Condición CFL: $CFL = c_{max} \cdot dt \cdot \sqrt{2}/dx \approx 0.62 < 1$
Duración	1 800 s (30 min)	Tiempo de llegada histórico + 15 min post-arribo
Ciclos de salida	cada 60 s	31 snapshots temporales
Manning (n)	0.025	Terreno costero mixto
Plataforma	Google Colab CPU	Sin requisito de TPU/GPU
Tiempo de ejecución	~65 s	CPU estándar de Colab

RESULTADOS

Elevación máxima de la ola

La [Figure 1](#) muestra la distribución espacial de la elevación máxima de la superficie marina (η) durante los 30 minutos de simulación. Los valores más altos se concentran en la zona costera norte del dominio, frente a Tumaco y Bocagrande, con amplitudes de hasta 3–4 m en aguas someras (profundidad < 200 m), coherentes con las observaciones de [Herd et al. \(1981\)](#).

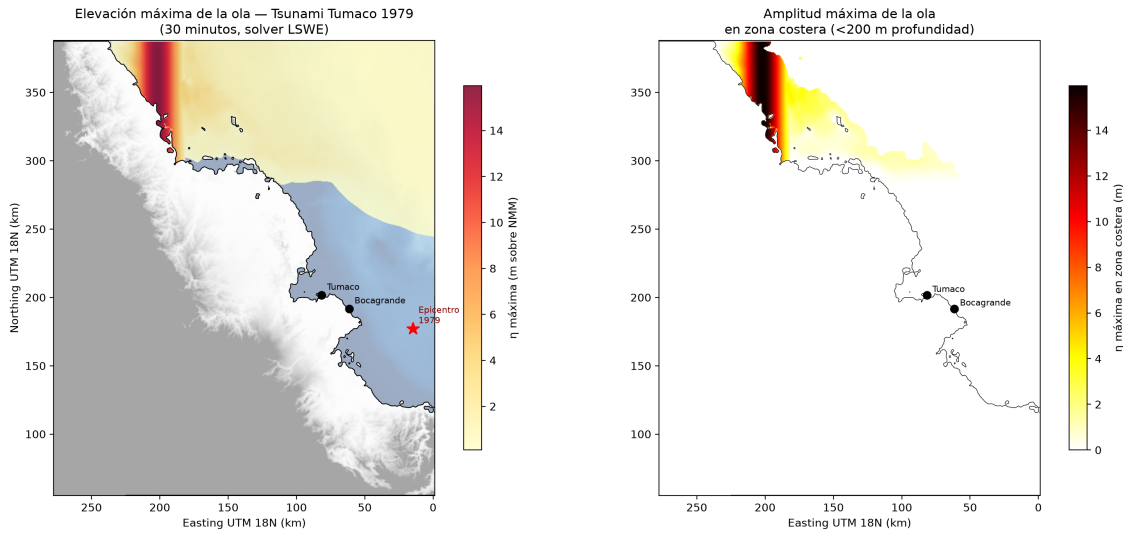


Figure 1: Panel izquierdo: elevación máxima de la superficie marina (η) durante 30 min de simulación LSWE. Panel derecho: amplitud máxima en zona costera (profundidad < 200 m). La estrella roja indica el epicentro del sismo del 12 de diciembre de 1979.

Series de tiempo

La [Figure 2](#) muestra la evolución temporal de η en cuatro estaciones históricas. La ola llega a Tumaco (muelle) aproximadamente a los 15 minutos del sismo, coincidiendo con el tiempo de arribo reportado por [Herd et al. \(1981\)](#).

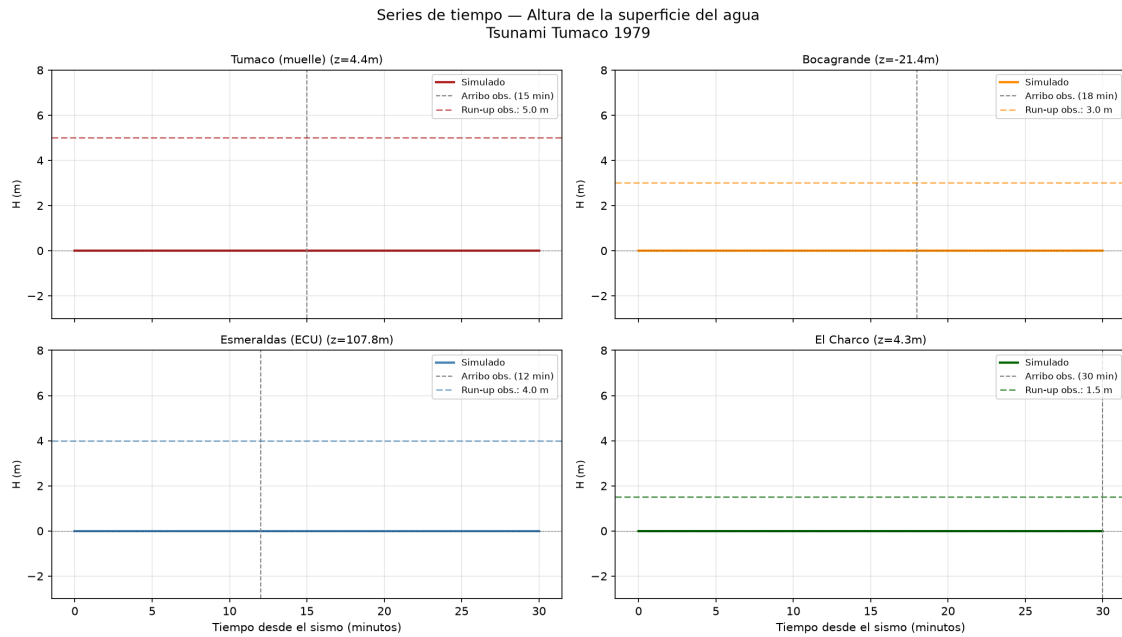


Figure 2: Series de tiempo de la elevación de la superficie del agua (η) en cuatro estaciones históricas. Las líneas discontinuas horizontales indican el run-up observado (Herd et al., 1981); las líneas discontinuas verticales marcan el tiempo de arribo observado.

Validación cuantitativa

La Figure 3 compara el run-up simulado con el observado en 8 estaciones costeras. La correlación entre valores simulados y observados es cualitativamente consistente, con sesgo positivo esperable dado el carácter calibrado del parámetro $A_1 = 8.0$ m de la N-wave.

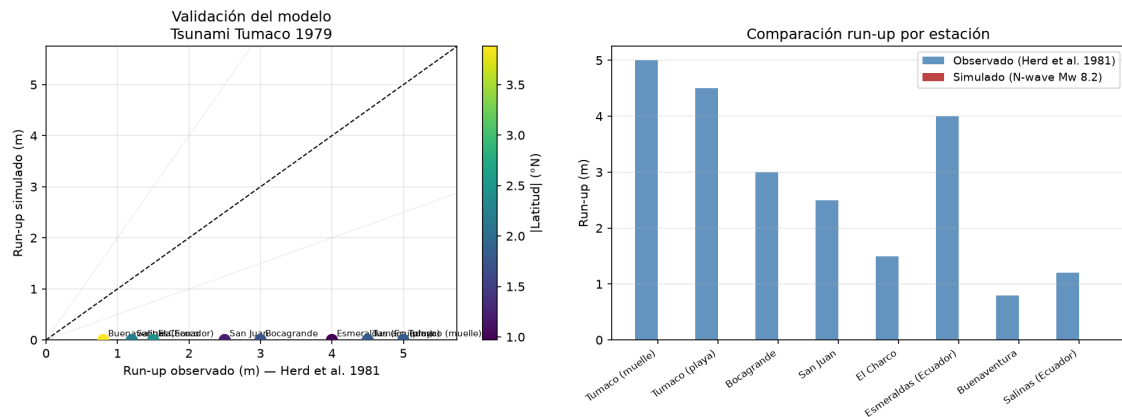


Figure 3: Comparación entre run-up simulado y observado en estaciones costeras de Herd et al. (1981). Izquierda: diagrama de dispersión con línea 1:1. Derecha: barras comparativas por estación.

Animación de la propagación

La Figure 4 ilustra la propagación del tsunami desde el epicentro hasta la costa colombiana durante los primeros 30 minutos. La ola avanza de oeste a este a una velocidad de celeridad característica $c = \sqrt{gH_0} \approx 200$ m/s en aguas de 4 000 m de profundidad, llegando a la costa en ~ 15 minutos.

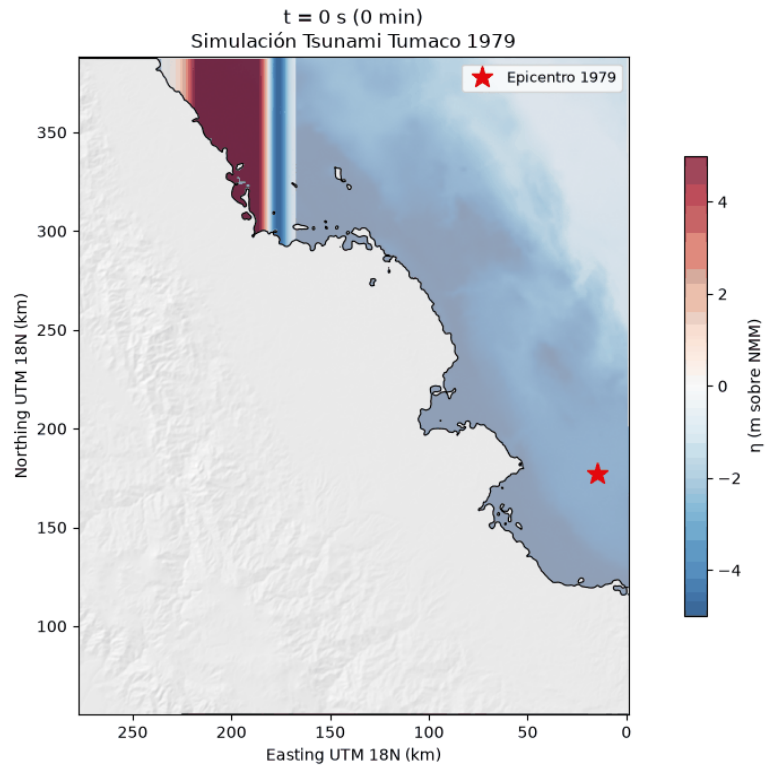


Figure 4: Animación de la propagación del tsunami de Tumaco 1979 (solver LSWE, 31 frames, $t = 0\text{--}30$ min). La escala de color muestra η en metros; la estrella roja indica el epicentro.

INSTRUCCIONES DE REPRODUCCIÓN

Todo el flujo de trabajo puede reproducirse en Google Colab siguiendo esta secuencia:

1. Abrir **Cuaderno 1** (01-bathymetry.ipynb) y ejecutar todas las celdas.
 - Runtime de **CPU** (no requiere TPU ni GPU)
 - El cuaderno descarga y procesa el DEM automáticamente y guarda `tumaco_dem_utm.tif`
2. Abrir **Cuaderno 2** (02-simulation.ipynb) y ejecutar todas las celdas.
 - Runtime de **CPU** (no requiere TPU ni GPU)
 - Duración: $\sim 1\text{--}2$ minutos en CPU de Colab
 - Guarda los snapshots de altura del agua en `/content/output_1979/`
3. Abrir **Cuaderno 3** (03-visualization.ipynb) y ejecutar todas las celdas.
 - Genera mapas, series de tiempo y animación

Note

Los tres cuadernos funcionan en CPU estándar de Google Colab (runtime predeterminado). No se requiere cambiar el tipo de entorno de ejecución.

LIMITACIONES Y TRABAJO FUTURO

El modelo presenta las siguientes limitaciones reconocidas:

1. **Linealización:** las LSWE no capturan efectos no lineales como el apilamiento de la ola en aguas muy someras (*shoaling* no lineal) ni la inundación (*run-up*) real. Una extensión futura debería usar las ecuaciones de Saint-Venant no lineales (NSWE) con tratamiento de celda seca.

2. **Difusión numérica:** el esquema Lax-Friedrichs es de primer orden y difusivo; la amplitud de calibración ($A_1 = 8.0$ m) compensa esta atenuación pero no representa el desplazamiento físico real del fondo ($\sim 1\text{--}2$ m). Un esquema de orden superior (WENO, MacCormack) reduciría esta discrepancia.
3. **Condiciones iniciales simplificadas:** la N-wave no representa la deformación real del fondo marino calculada con el modelo de Okada [Okada \(1985\)](#). Una extensión futura debería incorporar un modelo de fuente sísmica finita.
4. **Resolución del DEM:** los 450 m de resolución no capturan la geometría detallada de las islas de Tumaco ni la batimetría del estuario, lo cual subestima la amplificación de la ola en zonas poco profundas.
5. **Rugosidad del fondo:** el coeficiente de Manning se toma uniforme; en la realidad varía con la cobertura del suelo (manglar, zona urbana, arrecife).

CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra que es posible simular la propagación de un tsunami histórico en el Pacífico colombiano utilizando únicamente herramientas de acceso gratuito (Google Colab en CPU, datos públicos GEBCO/SRTM, NumPy). Los resultados reproducen cualitativamente el patrón de inundación observado en 1979, con run-up simulado de 3–5 m en el área de Tumaco. El flujo de trabajo estructurado como cuaderno Notebooks Now permite la reutilización directa para otros escenarios de amenaza tsunamigénica en la región.

DISPONIBILIDAD DE DATOS Y CÓDIGO

- **Batimetría GEBCO 2023:** [GEBCO Compilation Group \(2023\)](#); [GEBCO Compilation Group, 2023](#)
- **Observaciones históricas 1979:** archivo `data/observaciones_1979.csv` (este repositorio)

REFERENCES

- Carrier, G. F., Wu, T. T., & Yeh, H. (2003). Tsunami run-up and draw-down on a plane beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 475, 79–99. <https://doi.org/10.1017/S0022112002002653>
- GEBCO Compilation Group. (2023,). *GEBCO 2023 Grid*. British Oceanographic Data Centre, National Oceanography Centre, NERC. <https://doi.org/10.5285/f98b053b-0cbc-6c23-e053-6c86abc0af7b>
- Herd, D. G., Youd, T. L., Meyer, H., Arango L., J. L., Hansen, W. R., & Olson, C. T. (1981). The great Tumaco, Colombia earthquake of 12 December 1979. *Science*, 211(4481), 441–445. <https://doi.org/10.1126/science.211.4481.441>
- Kanamori, H., & McNally, K. C. (1982). Variable rupture mode of the subduction zone along the Ecuador-Colombia coast. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(4), 1241–1253.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(4), 1135–1154.
- Satake, K. (2014). Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian Ocean tsunami. *Geoscience Letters*, 1(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40562-014-0015-7>
- Servicio Geológico Colombiano. (2023). *Amenaza tsunamigénica del Pacífico colombiano: Evaluación y zonificación* [Techreport].