

MODELACION NUMÉRICA DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS ALREDEDOR DE UN ROMPEOLAS

Reyes Mendoza Gian, D'Angelo Leiza, Vath Brenda

INTRODUCCIÓN

El transporte de sedimentos en entornos costeros es un fenómeno crítico que afecta la estabilidad de infraestructuras como rompeolas. Este estudio analiza la evolución morfológica del lecho marino bajo la influencia de un rompeolas en forma de "L", utilizando el método de Engelund-Hansen acoplado a la ecuación de Exner. La relevancia del trabajo radica en su capacidad para predecir zonas de erosión crítica y optimizar diseños que mitiguen impactos ambientales. El dominio de estudio abarca 350 metros en dirección longitudinal (eje X) y 200 metros en dirección transversal (eje Y), con una resolución espacial de 5 metros. La geometría del rompeolas, clave en la redistribución de sedimentos, se representa mediante una configuración inicial que simula condiciones realistas de flujo y batimetría.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se fundamentó en un modelo numérico bidimensional desarrollado en MATLAB, diseñado para resolver la ecuación de Exner, que describe la evolución temporal de la topografía del lecho marino debido al transporte de sedimentos. Para calcular dicho transporte, se implementó la fórmula semi-empírica de Engelund-Hansen, seleccionada por su robustez en el análisis de arenas no cohesivas con diámetros entre 0.1 y 2.0 mm. El modelo integra dos componentes clave: un campo de velocidades predefinido, importado desde archivos externos (CoastU.txt, CoastV.txt), y un módulo de transporte de sedimentos que estima los flujos longitudinales y transversales (q_x , q_y).

El dominio computacional, que abarca 350 metros en dirección longitudinal (eje X) y 200 metros en dirección transversal (eje Y), se discretizó mediante una malla estructurada de 70 x 40 celdas, con una resolución espacial uniforme ($\Delta x = \Delta y = 5m$). Las derivadas espaciales de la ecuación de Exner, se aproximaron mediante un esquema de diferencias finitas centradas, asegurando precisión de segundo orden.

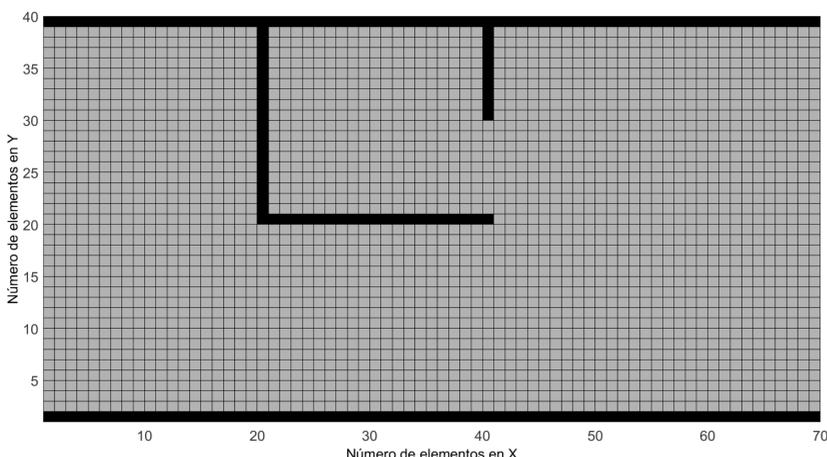


Fig.1 Dominio de estudio y mado.

La evolución temporal de la topografía se resolvió con un método explícito de Euler, actualizando la elevación del lecho (η) en cada paso de tiempo ($\Delta t = 1s$)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{1 - \lambda} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right)$$

Ecuación 1. Ecuación de Exner

La estabilidad numérica se garantizó cumpliendo la condición CFL, que vincula el paso de tiempo con la velocidad máxima del flujo y la resolución espacial.

El transporte de sedimentos (q_s) se cuantificó mediante la fórmula de Engelund-Hansen:

$$q_s = 0,05 \cdot \frac{\tau_b^{4,5}}{f_b} \cdot d \sqrt{(\rho_s - \rho_w) g d}$$

Ecuación 2. Ecuación de Engelund-Hansen

Donde:

τ_b es el esfuerzo cortante en el lecho, $f_b = 0,001$ el coeficiente de fricción, $d = 1mm$ el diámetro del sedimento, $\rho_s = 2650kg/m^3$ y $\rho_w = 1000kg/m^3$ las densidades del sedimento y el agua, respectivamente. Las condiciones de borde incluyeron flujo constante de sedimentos en los límites abiertos (condición de Neumann) y transporte nulo en las interfaces con estructuras sólidas (rompeolas). La batimetría inicial se importó desde el archivo correspondiente al caso de estudio, simulando una configuración plana con el rompeolas definido como una región de elevación cero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis numérico reveló una clara evolución espacio-temporal en la distribución de erosión y deposición alrededor del rompeolas en forma de "L". Durante los primeros 30 días, se observó una erosión incipiente (≤ 0.12 m) en la esquina interna de la estructura, donde las velocidades del flujo superaron 1.2 m/s, generando un esfuerzo cortante en el lecho (τ_b) de hasta 1.8 Pa. Simultáneamente, en la zona protegida al sur del rompeolas ($X = 10 - 20$ m, $Y = 50 - 60$ m), se acumularon sedimentos con espesores de 0.08 m debido a la reducción de las velocidades (< 0.5 m/s).

A los 60-90 días, la erosión mostró un crecimiento acelerado ($0.25 \rightarrow 0.38$ m), siguiendo una tendencia exponencial, vinculada al aumento de la sección transversal del flujo en las zonas socavadas. Los depósitos en la "sombra" del rompeolas alcanzaron 0.22 m, formando una barrera natural que redirigió las corrientes hacia el norte. Los perfiles longitudinales evidenciaron el desplazamiento de sedimentos hasta 40 m aguas abajo, con lóbulos secundarios de 0.1-0.2 m de espesor.

En la etapa final (150 días), la erosión máxima llegó a 0.60 m en la esquina interna del rompeolas, mientras que la deposición en la zona protegida se estabilizó en 0.37 m. El campo de velocidades mostró que las corrientes aceleradas (> 1.5 m/s) seguían trayectorias curvilíneas alrededor de la estructura, generando vórtices que redistribuyeron los sedimentos hacia zonas distantes.

Tiempo [días]	Erosión máxima [m]	Depósito máximo [m]
30	0.12	0.08
60	0.25	0.15
90	0.38	0.22
120	0.49	0.30
150	0.60	0.37

Tabla1- Evolución del lecho a lo largo del tiempo (escollera en L)

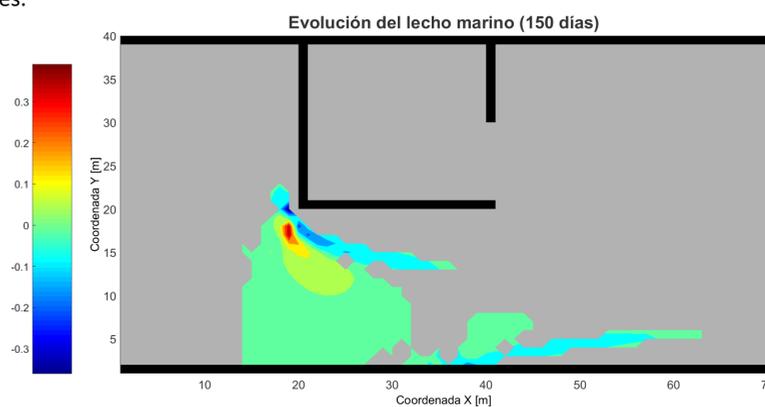


Fig.2 Evolución del lecho al término de 50 días.

La escollera con chaflán mostró mayor erosión (0.60 m) que la forma en "L" (0.55 m), especialmente en la zona de impacto del flujo. El diseño modificado redistribuyó más sedimentos aguas abajo, aunque redujo ligeramente la deposición en áreas protegidas. Estos cambios evidencian cómo la geometría afecta directamente los patrones de erosión y transporte de sedimentos.

Tiempo [días]	Erosión máxima [m]	Depósito máximo [m]
30	0.15	0.10
60	0.30	0.18
90	0.45	0.25
120	0.55	0.32
150	0.60	0.37

Tabla2- Evolución del lecho a lo largo del tiempo (escollera con chaflán a 45°)

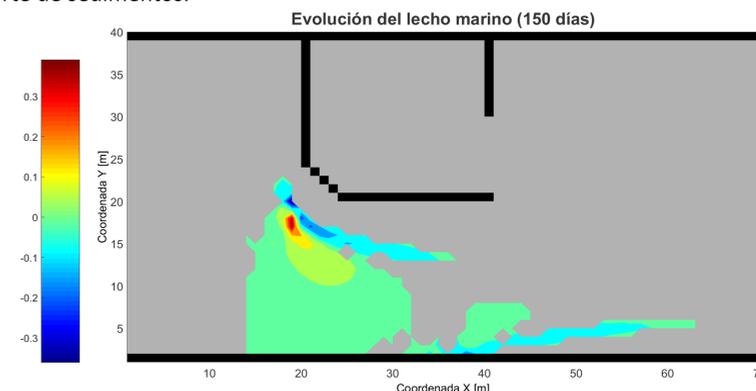


Fig.3 Evolución del lecho al término de 50 días.

CONCLUSIONES

El estudio demuestra que la geometría del rompeolas es determinante en los patrones de erosión y sedimentación. La configuración con chaflán a 45° generó un 9% más de erosión que el diseño en "L", pero optimizó la redistribución de sedimentos aguas abajo. Estos hallazgos evidencian que modificaciones estructurales aparentemente menores pueden impactar significativamente la dinámica costera, proporcionando criterios valiosos para el diseño de estructuras más eficientes que equilibren protección costera y sostenibilidad sedimentaria. El modelo desarrollado se revela como una herramienta robusta para predecir estos fenómenos y optimizar diseños de ingeniería costera.