

Modelización numérica 3D de la erosión local a la salida de obras de drenaje transversal

3D Numerical modelling of local scour at culverts outlets

Cortés, R.^{a1}, Galán, A.^{a2} y Díaz, S.^{a3}

^{a1}Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación. Edificio Politécnico Av. Camilo José Cela s/n, 13071, Ciudad Real (España).
E-mail: ^{a1}Raul.Cortes1@alu.uclm.es, ^{a2}Alvaro.Galan@uclm.es, ^{a3}Sarai.Diaz@uclm.es

Recibido: 18/07/2018

Aceptado: 05/04/2019

Publicado: 30/04/2019

Citar como: Cortés, R., Galán, A., Díaz, S. (2019). 3D Numerical modelling of local scour at culverts outlets. *Ingeniería del agua*, 23(2), 123-139. <https://doi.org/10.4995/la.2019.10545>

RESUMEN

Las Obras de Drenaje Transversal (ODTs), frecuentes en obras lineales para recomponer la red natural de drenaje interceptada por ellas, deben ser capaces no solo de drenar el agua de su cuenca sino también de controlar la erosión local en sus inmediaciones debido a las fuertes avenidas. Su funcionamiento hidráulico y en consecuencia su poder erosivo vienen determinados por la magnitud del caudal circulante, que depende del entorno, y por las características geométricas y constructivas de la ODT. Si la erosión local no se controla de forma adecuada, puede llegar incluso a afectar a la seguridad de las infraestructuras lineales. Este trabajo muestra la calibración de un modelo numérico en el software FLOW-3D, de tal manera que se reproducen los resultados más importantes en cuanto a erosión local se refiere del modelo físico de una obra de drenaje transversal. Este estudio puede servir de base para el análisis de diversas situaciones y medidas de protección. Los resultados numéricos, aun tratándose la erosión local de un problema altamente no lineal y tridimensional, muestran una buena aproximación a las medidas realizadas en el modelo físico.

Palabras clave | erosión local; transporte de sedimentos; CFD; FLOW-3D; obra de drenaje transversal.

ABSTRACT

Culverts, which are common in linear works to reassemble the natural drainage network that such infrastructures intercept, should be able to drain catchment runoff and control local scour in heavy rainfall scenarios. Their hydraulic functioning and hence their erosive power come determined by the magnitude of the circulating flow rate, which depends on the characteristics of the surroundings, and the geometrical and constructive details of the own culvert. If local scour is not well controlled, it can even affect the security of the linear infrastructures where they are located. This work presents the calibration of a numerical model in FLOW-3D software, in such way that it simulates the most important results in terms of local scour on a down-scale model of a culvert. This study could serve as basis for the analysis of different situations and protective measures. Even though local scour is a highly non-linear and tridimensional problem, numerical results show a good degree of approximation to the measurements made in the physical model.

Key words | local scour; sediment transport; CFD; FLOW-3D; culvert.

INTRODUCCIÓN

Las Obras de Drenaje Transversal (ODT) son estructuras construidas en las infraestructuras lineales, como carreteras y ferrocarriles, para regenerar la red de drenaje natural de la cuenca interceptada por ellas. Tradicionalmente, el análisis en este tipo de obras se ha centrado únicamente en su funcionamiento hidráulico, comprobando su capacidad de desagüe y el efecto sobre las zonas aledañas susceptibles de sufrir inundaciones (Abida y Townsend, 1991; Sorourian *et al.*, 2014). Sin embargo, también es necesario prestar atención a los fenómenos de erosión local que se producen a la salida de la ODT, ya que podrían provocar graves problemas de inestabilidad en la propia ODT o incluso en las infraestructuras lineales donde se alojan (Day *et al.*, 2001). Este último aspecto, la afección al talud por erosión local a la salida de la ODT, así como las medidas para su mitigación han sido poco o nada estudiados hasta la fecha (Mendoza *et al.*, 1983; Abt *et al.*, 1996). Junto con lo anterior, los experimentos que se han realizado tradicionalmente son de pequeña escala y, en su mayoría con un carácter bidimensional (2D), por lo que el cambio a un entorno de mayor escala podrá influir en las variables hidrodinámicas (Sarathi *et al.*, 2008). Además, la gran cantidad y variedad de ODTs existentes exige analizar cómo se puede ver afectado el proceso de erosión por las propias características de la obra y su entorno. Prueba de ello son las metodologías presentadas en los trabajos desarrollados por “Roads and Traffic Authority” (2010) y Campos *et al.* (2017), en las que se pone de manifiesto la necesidad de evaluar periódicamente el riesgo de mal funcionamiento en cada ODT, valorando el comportamiento de la estructura frente a la erosión y/u otros modos de fallo. No obstante, estas propuestas estiman de modo aproximado el fenómeno de erosión, evidenciando que se requieren más estudios adicionales y específicos para caracterizar el proceso.

En este sentido, son varios los autores que han desarrollado modelos físicos para caracterizar experimentalmente el fenómeno de erosión en las proximidades de las ODTs. Estos estudios han permitido identificar la relación del calado aguas abajo Y_t (del inglés *tailwater depth*) respecto al diámetro (d) de la ODT (Bohan, 1970), el tamaño del sedimento (siendo d_{50} el percentil 0.5 de la distribución granulométrica) (Abida and Townsed, 1991) y el número de Froude densimétrico (F_0) (Day *et al.*, 2001), entre otros, como variables determinantes para la geometría de erosión. Recientemente Sorourian *et al.* (2014) han analizado la influencia de la obstrucción de la entrada de la ODT. El número de Froude densimétrico introducido antes se define como

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g\Delta d_{50}}} \quad (1)$$

siendo U_0 la velocidad media a la salida de la ODT, g la aceleración de la gravedad y Δ la densidad relativa sumergida del sedimento. La caracterización geométrica de la erosión tiende a realizarse en términos de la profundidad máxima de erosión ($d_{s,max}$) y el ancho de erosión (w). No obstante, existen otras muchas dimensiones que influyen en la estabilidad del conjunto, como pueden ser la localización tanto de la máxima sedimentación como de la máxima profundidad de erosión (distancia a la salida de la ODT), o la profundidad de erosión a la salida del tubo (d_{s0}). Todas estas dimensiones dependen de los parámetros del flujo y de las características del sedimento (Chatterjee *et al.*, 1994; Abdelaziz *et al.*, 2010; Mehnifard *et al.*, 2015).

El principal inconveniente de la modelación física es que para reproducir la realidad se deben tener en cuenta un gran número de variables e hipótesis, con el alto coste económico que ello conlleva. En este contexto, la modelización numérica se presenta como una solución que tiene potencial para analizar cada caso particular a escala real. No obstante, hasta la fecha son muy pocos los trabajos en la literatura acerca de modelos numéricos que tratan de caracterizar los efectos de la erosión local a la salida de una ODT. Para abordar la modelización de este problema se han caracterizado los aspectos más importantes de otros problemas similares, tales como la erosión local producida aguas abajo de una compuerta y en las proximidades de las pilas de un puente. En estos casos se ha visto que la predicción de la erosión y la sedimentación puede resultar errónea para largos tiempos comprendidos entre 5 y 10 minutos, en función de la magnitud del problema (Abdelaziz *et al.*, 2010). Además, dada la alta dependencia de los resultados con el mallado, el modelo tiene que ser calibrado en función del tiempo de simulación utilizando una buena definición de malla en la zona de erosión. Sangdo *et al.* (2015) recomiendan hacer un modelo 3D con una buena calibración de los parámetros que intervienen en las formulaciones, así como la simulación previa del problema a analizar sin tener en cuenta la erosión, para conseguir la estabilización del flujo (Burkow and Griebel, 2016; Zhang *et al.*, 2017). Esta estabilización servirá como condición inicial de la simulación propia del proceso de transporte de sedimentos.

El presente estudio tiene el propósito de analizar el comportamiento de un modelo numérico tridimensional para el estudio del fenómeno de erosión local a la salida de una ODT. Para ello, se realiza un ensayo en modelo físico, del cual se prepara el modelo numérico 3D equivalente en FLOW-3D. El objetivo principal es calibrar los parámetros del modelo numérico (hidrodinámica, turbulencia y transporte de sedimentos) 3D a partir de los resultados del modelo experimental, comparando finalmente los resultados de la erosión a lo largo del tiempo a una cierta distancia de la salida de la ODT, el perfil de erosión longitudinal y transversal (también llamado este último perfil de socavación), y el área de la misma bajo la ODT, entre ambos modelos. En los siguientes apartados se explicarán las características y la metodología adoptada para construir el modelo numérico (tras una breve descripción de su modelo físico), y posteriormente se expondrán y discutirán los resultados, presentándose finalmente las conclusiones principales de la simulación numérica, así como su utilidad y sus ventajas frente al modelo experimental.

MATERIAL Y MÉTODOS

En esta sección se describirán brevemente las particularidades del modelo físico utilizado como base para la simulación numérica, explicándose luego en detalle las características del modelo numérico.

Modelo experimental

La Figura 1 muestra un esquema del modelo físico realizado. El experimento se llevó a cabo en un canal plano del Laboratorio de Hidráulica de la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real (UCLM) con 4 m de longitud, 3 m de ancho y un espesor de sedimentos de 0.7 m. Se empleó un sedimento cuarcítico con $d_{50}=1.20$ mm y granulometría uniforme de acuerdo a Abt *et al.* (1984) (coeficiente de dispersión granulométrica $\sigma_g \approx 1.20$) de forma que se puedan despreciar los efectos de armado. La ODT se compone de 2 tubos circulares sin pendiente contruidos con metacrilato con un diámetro interior $d=0.153$ m y una longitud $L=2$ m, de forma que el ratio $L/d \approx 13$, que es un valor habitual en la práctica. Además, el ratio de expansión $B/d=19.6 \gg 10$, lo que asegura, de acuerdo a Lim (1995), que el cauce receptor no influye de forma significativa en la erosión. La separación entre los ejes de ambos tubos se fijó en 2 veces el diámetro interior.

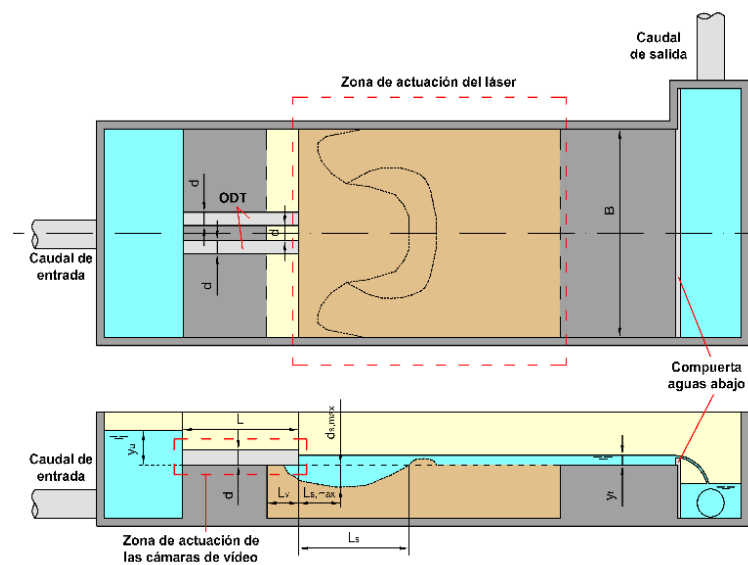


Figura 1 | Esquemas del montaje experimental: planta y alzado.

Se ha empleado una configuración en voladizo de forma que la parte final del talud se asienta sobre sedimento. Así, la erosión puede progresar bajo el talud y se puede medir el descalce del mismo, tanto en forma (perfil transversal) como en magnitud (área socavada). El caudal de entrada se fijó en 24.87 l/s (medido mediante un caudalímetro electromagnético de precisión ± 0.01 l/s) y el calado en el canal receptor, fijado mediante compuerta de guillotina aguas abajo, fue de $Y_t = 9.8$ cm. Con esas condiciones, se midió un calado justo a la salida de los tubos de $Y_0 = 10$ cm, siendo el calado aguas arriba de los tubos de 2 veces el diámetro de los mismos. Esas condiciones se mantuvieron durante 10 minutos, tras lo cual se procedió a la retirada del agua y a realizar un escaneo láser de la superficie con una precisión de ± 0.2 mm en una malla regular de 5×5 cm en planta. El estado final de la zona ocupada con sedimento, incluyendo el área socavado bajo el talud, puede verse en la Figura 2. El tiempo de simulación se ha elegido de forma que se puedan captar los fenómenos principales durante el inicio de la erosión y los primeros estadios de su evolución, en ningún caso para obtener la erosión de equilibrio, ya que esto implicaría ensayos de varios días (o semanas) de duración y numéricamente sería inviable. No obstante, la mayor parte de la erosión se da en estos primeros instantes y se trabaja con sedimento no cohesivo (caso más desfavorable), por lo que se considera una buena aproximación.



Figura 2 | Montaje experimental: Zona de erosión a analizar.

Modelo numérico

La metodología adoptada para la resolución del modelo numérico es la dinámica de fluidos computacional, (CFD, del inglés *Computational Fluid Dynamics*). Estas técnicas resuelven las ecuaciones de gobierno (conservación de la masa, momento y energía) estableciendo una discretización de volúmenes de control y empleando métodos numéricos apropiados para conseguir la convergencia necesaria, reduciendo el error de manera iterativa hasta que es suficientemente pequeño. Para la resolución del problema, se ha empleado el software FLOW-3D, habitual en múltiples aplicaciones en el área de Ingeniería Civil, tales como hidráulica, marítima, energía o saneamiento entre otros (Mehnifard *et al.*, 2015). Para la correcta simulación del modelo, se ha empleado la herramienta FAVOR que incluye FLOW-3D, la cual realiza un renderizado inicial de la geometría introducida (solo permite trabajar con volúmenes en forma de ortoedros), decidiendo que volúmenes pueden considerarse como elemento sólido y cuáles están libres para la circulación del flujo. Este mismo procedimiento lo realiza en cada paso de tiempo para decidir las regiones de dominio ocupadas por sedimento, de forma que, aunque la malla es fija en el tiempo, permite una movilidad constante del sedimento. Con ella es posible identificar aquellos elementos con una insuficiente definición, pudiendo causar problemas en el desarrollo de la erosión, y por consiguiente, no reproducir adecuadamente el flujo a la salida de la ODT.

Los fenómenos físicos que gobiernan el problema de la erosión local a la salida de las ODT son el efecto de la gravedad, el modelo de turbulencia y el modelo de transporte de sedimentos. A continuación, se describe el procedimiento utilizado para la calibración del modelo numérico.

a. Ecuaciones de gobierno del flujo

Puesto que el problema requiere flujo en lámina libre, se emplea el método de volumen de fluido (VOF, del inglés *Volume Of Fluid*) (Flow-Science, 2016), según el cual, la ecuación de la masa es modificada por una función $F(x,y,z,t)$ que representa

el volumen del fluido por unidad de volumen. Cuando F es 1, existe fluido y cuando es 0 son regiones vacías. Por su parte, las ecuaciones de gobierno de la conservación de la cantidad de movimiento, referidas a un flujo incompresible y newtoniano, vienen dadas por las ecuaciones de Navier-Stokes. La formulación, así como la discretización de dichas ecuaciones, se pueden consultar en Flow-Science (2016).

b. Modelo de turbulencia

De todos los modelos de turbulencia disponibles en el software, en este trabajo se han empleado el modelo RNG y el modelo $k-\omega$. El modelo RNG (del inglés, *Re-Normalized Group*), se ha utilizado ya que resulta conveniente cuando prevalecen de forma general bajas intensidades del flujo turbulento, además de que aproxima mejor los resultados de erosión y velocidades en comparación con el modelo $k-\varepsilon$ (Flow-Science, 2016; Zhang et al., 2017). Por su parte, el modelo $k-\omega$ funciona mejor cuando hay cerca condiciones de pared (Flow-Science, 2016). De forma general, el modelo RNG introduce una mayor disipación en sus ecuaciones con respecto al modelo $k-\omega$. Es por ello que la erosión resultante puede resultar diferente a lo largo del perfil longitudinal de la ODT. A continuación, se describen las principales ecuaciones por las que se rigen ambos modelos.

En cuanto al modelo RNG, son dos las ecuaciones de transporte que utiliza, una para la energía cinética (k_T), y otra para la disipación turbulenta (ε_T). Estas ecuaciones son similares al modelo de turbulencia $k-\varepsilon$, pero la diferencia es que algunas constantes de ecuaciones son derivadas implícitamente en RNG. La ecuación de transporte de la energía cinética es

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \cdot \left(u \cdot A_x \cdot \frac{\partial k_T}{\partial x} + v \cdot A_y \cdot \frac{\partial k_T}{\partial y} + w \cdot A_z \cdot \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + Diff_{kT} - \varepsilon_T \quad (2)$$

Los diferentes coeficientes de la Ecuación (2) son: la producción de la energía cinética turbulenta (P_T), los efectos de la flotabilidad (G_T), la convección y difusión de la energía cinética turbulenta ($Diff_{kT}$), y la disipación (ε_T) debido a las pérdidas viscosas de los efectos de rozamiento. Por último, la ecuación de transporte de la disipación turbulenta es la siguiente:

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \cdot \left(u \cdot A_x \cdot \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v \cdot A_y \cdot \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w \cdot A_z \cdot \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) = \frac{CDIS1 \cdot \varepsilon_T}{k_T} (P_T + CDIS3 + G_T) + Diff_{\varepsilon} - CDIS2 \cdot \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (3)$$

siendo $Diff_{\varepsilon}$ la convección y difusión de la disipación turbulenta del modelo RNG, y los coeficientes CDIS1, CDIS2 y CDIS3 parámetros del modelo, que pueden ser modificados por el usuario para ajustar mejor la solución del problema. Los valores que toman por defecto son CDIS1 = 1.42 y CDIS3 = 0.20, mientras que CDIS2 se calcula de manera automática desde la energía cinética turbulenta (k_T) y su producción (P_T). Para más detalles, se puede consultar Flow-Science (2016). La Tabla 1 recoge todos los coeficientes modificables por el usuario, especificándose la descripción de su influencia y su valor por defecto.

Tabla 1 | Parámetros intrínsecos del modelo de turbulencia RNG modificables por el usuario.

Parámetro	Descripción	Valor por defecto
RMDTKE	Difusión de la disipación turbulenta	1.39
CDIS3	Flotabilidad de la disipación turbulenta	0.20
RMTKE	Difusión de la energía turbulenta	1.39
CNU	Evaluación de la viscosidad turbulenta	0.085
CDIS 1	Transporte de la disipación turbulenta	1.42
RMRHO	Difusión de la densidad	1/0.7 ≈ 1.42
RMRHOE	Difusión de la energía	1/0.7 ≈ 1.42

Por su parte, el modelo $k-\omega$, también utiliza dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética (k_T), donde se modifica el último término de la Ecuación (2), y otra para la disipación turbulenta, ω_T . La ecuación de transporte de energía es

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \cdot \left(u \cdot A_x \cdot \frac{\partial k_T}{\partial x} + v \cdot A_y \cdot \frac{\partial k_T}{\partial y} + w \cdot A_z \cdot \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + Diff_{kT} - \beta^* \cdot k \cdot \omega \quad (4)$$

donde ω es igual a ε/k , siendo ε la disipación pura y k la energía cinética pura, y β^* representa una ecuación dependiente de k_T y ω_T . Por último, la ecuación de transporte de la disipación turbulenta, es la siguiente

$$\frac{\partial \omega_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \cdot \left(u \cdot A_x \cdot \frac{\partial \omega_T}{\partial x} + v \cdot A_y \cdot \frac{\partial \omega_T}{\partial y} + w \cdot A_z \cdot \frac{\partial \omega_T}{\partial z} \right) = \alpha \cdot \frac{\omega_T}{k_T} (P_T + CDIS3 + G_T) + Diff_\omega - \beta \cdot \omega_T^2 \quad (5)$$

siendo α una constante de valor 0.52, $Diff_\omega$ la convección y difusión de la disipación turbulenta del modelo $k-\omega$, y β representa una ecuación dependiente de ω . En este caso, los parámetros modificables por el usuario son los que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 | Parámetros intrínsecos del modelo de turbulencia $k-\omega$ modificables por el usuario.

Parámetro	Descripción	Valor por defecto
CDIS 3	Flotabilidad de la disipación turbulenta	0.20
RMTKE	Difusión de la energía turbulenta	0.50
RMDTKE	Difusión de la disipación turbulenta	0.50

c. Modelo de transporte de sedimentos

En este apartado se describen las ecuaciones que gobiernan el módulo de erosión, la sedimentación y la advección, en el cálculo del transporte de los sedimentos en suspensión, la caída de grano debido a la gravedad, la velocidad crítica a la que se da el arrastre del sedimento debido al rozamiento entre el terreno y el flujo y las perturbaciones del mismo y, el efecto o no de la pendiente cuando se va depositando el sedimento, el cual considera la modificación de la tensión crítica de fondo ($\theta'_{cr,i}$) mediante la interacción entre el fluido y el sedimento.

Puesto que resulta complicado establecer las relaciones entre el volumen erosionado debido a las fuerzas que actúan en el grano y la posición donde va a ser depositado debido a la dinámica del flujo, el software emplea una serie de formulaciones empíricas, que se pueden ajustar al problema para su correcta simulación. En este estudio se ha utilizado la ecuación de Soulby-Whitehouse para determinar la tensión crítica de fondo o parámetro de Shields. Para determinar la cantidad de volumen de sedimento que es arrastrado, por un lado es necesario calcular el volumen adimensional de sedimento (φ_i) y luego computarlo en términos de volumen por tiempo (caudal) por unidad de ancho ($q_{b,i}$). En FLOW-3D se pueden utilizar tres modelos de transporte a conveniencia, todos ellos del tipo “*exceso de tensión cortante*”: el modelo de transporte de Meyer, Peter & Müller, el modelo de Nielsen y el modelo de Van Rijn, dadas por las Ecuaciones (6), (7) y (8), respectivamente.

$$\varphi_i = \beta_{MPM,i} \cdot (\theta_i - \theta'_{cr,i})^{1.5} \cdot c_{b,i} \quad (6)$$

$$\varphi_i = \beta_{Nie,i} \cdot \theta_i^{0.5} \cdot (\theta_i - \theta'_{cr,i}) \cdot c_{b,i} \quad (7)$$

$$\varphi_i = \beta_{VR,i} \cdot d_{*,i}^{-0.3} \cdot \left(\frac{\theta_i}{\theta'_{cr,i}} - 1 \right)^{2.1} \cdot c_{b,i} \quad (8)$$

donde $\beta_{MPM,i}$, $\beta_{Nie,i}$ y $\beta_{VR,i}$ son los coeficientes de transporte (Flow-Science, 2016) asociados a los diferentes modelos (sus valores por defecto son 8, 12 y 0.053, respectivamente). θ_i es la tensión tangencial local debido al flujo. El caudal sólido unitario vendrá dado por

$$q_{b,i} = \varphi_i \cdot \left[g \cdot \frac{(\rho_i - \rho_f)}{\rho_f} \cdot d_i^3 \right]^{0.5} \quad (9)$$

donde d_i es el tamaño medio del grano, $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$, es la densidad del fluido, $g = -9.81 \text{ m/s}^2$ es la gravedad (sentido negativo en la dirección z), y $\rho_i = 2650 \text{ kg/m}^3$ es la densidad del sedimento. En el modelo numérico se ha tenido en cuenta la fracción de empaquetado máxima igual a 0.65 (porosidad de 0.35), una rugosidad $k_s = 2.5 d_{50}$ y un ángulo de rozamiento interno de 28° . Para

el coeficiente de Richardson-Zaki, el coeficiente de difusión molecular y el coeficiente multiplicador de difusión turbulenta se han empleado sus valores por defecto.

d. Métodos numéricos

Las ecuaciones anteriores son resueltas en FLOW-3D mediante el método de volúmenes finitos con un procedimiento iterativo. Algunas particularidades que condicionan la convergencia del problema son las condiciones de contorno en los cuerpos rígidos y las superficies libres, el algoritmo numérico empleado y la estabilidad numérica. En primer lugar, se ha considerado la condición de superficie libre de tensiones tangenciales, siendo este valor nulo en todas las superficies, ya que de acuerdo a la relación B/d , ésta resulta mayor a 10 y por tanto puede despreciarse en el problema analizado. El algoritmo empleado ha sido el llamado GMRES (del inglés, *Generalized Minimum Residual Solver*), el cual es utilizado especialmente para mallas con celdas de tamaños variables, cuando existe la presencia de generación de altas fuentes de flujo y condiciones de simetría (Flow-Science, 2016). En este trabajo se resuelve el modelo 3D con un tiempo de simulación máxima de 600 segundos, en lámina libre, flujo incompresible y un solo fluido (agua). Los resultados se han guardado cada 60 segundos, tiempo similar a las medidas tomadas experimentalmente. Se realiza una inicialización de un minuto sin considerar transporte de sedimentos para que el flujo se estabilice y no de problemas de convergencia al inicio de la simulación. Con ello, se puede comprobar que tanto el calado como la velocidad a la salida de la tubería son similares a los valores medidos.

El orden de precisión en la resolución de las ecuaciones de momento, y la longitud de mezcla, se pueden variar para que se produzca una buena disipación y transmisión de la energía cinética en el proceso de erosión (Flow-Science, 2016). Posteriormente (apartado f) se ajustarán ambos para conseguir un buen grado de aproximación a los resultados experimentales.

e. Geometría y mallado

De manera general, la geometría del modelo es rectangular y constituye un subdominio respecto al dominio total del modelo físico de $3.000 \times 1.000 \times 0.473$ m, en dirección longitudinal (x), transversal (y) y vertical (z) respectivamente, para centrarse en los resultados de la erosión a la salida de la ODT. Nótese que únicamente se ha simulado la mitad del dominio aprovechando la simetría del problema respecto al plano xz. Los elementos que se han considerado en la modelización son un sólido (el cual reproducirá el talud con la tubería a forma de agujero y la pared voladizo), la cama de sedimento (donde tendrá lugar la erosión), y regiones de “no flujo” (las cuales, han sido muy útiles para ahorrar tiempo de computación, ya que la solución en dichas regiones no aportaría información adicional y consumiría recursos). La Figura 3 muestra dichos elementos: sólidos (color azul), cama de sedimento (color rojo) y regiones de “no flujo” (color amarillo). Estas regiones están situadas a la salida de la tubería (por encima de la cota alcanzada por el fluido) y en las zonas del sedimento en donde no afecta al fenómeno de la erosión local.

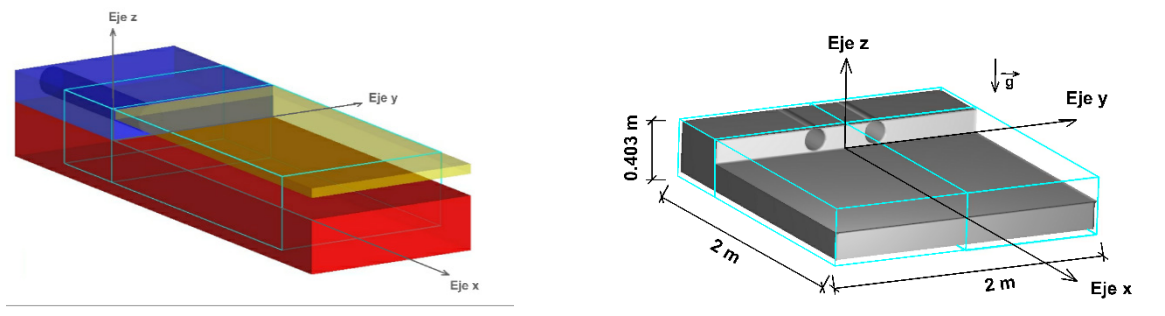


Figura 3 | Modelo 3D del problema en FLOW-3D, elementos (izquierda) y renderizado (derecha).

El mallado que se ha definido viene dado por dos bloques de malla, ya que estos permiten reducir el tiempo computacional, controlar mejor los errores de criterios de ratio entre el tamaño de las celdas entre los bloques de malla, y mantener la regularidad de los resultados de erosión. En estos bloques, se han utilizado 11 planos de malla en total con la misma relación del tamaño de

celda mínimo. A continuación, se describen las condiciones de contorno más importantes de los bloques de malla aplicadas en sus caras en cada eje cartesiano (x,y,z):

- Dirección x : condición de caudal constante (al inicio de la tubería), de 12.435 L/s, y condición de altura de la lámina de agua al final de 0.098 m.
- Dirección y : condición de simetría en $y=0$, y condición de pared en $y=1$ m (lado opuesto).
- Dirección z : condición de pared en z mínimo del dominio y condición de presión atmosférica en z máximo.

Como condición inicial se ha establecido una región de fluido en toda la cama de sedimento para simular que está saturado al inicio del ensayo. La Figura 4 muestra el mallado adoptado en el modelo 3D y las condiciones de contorno descritas anteriormente.

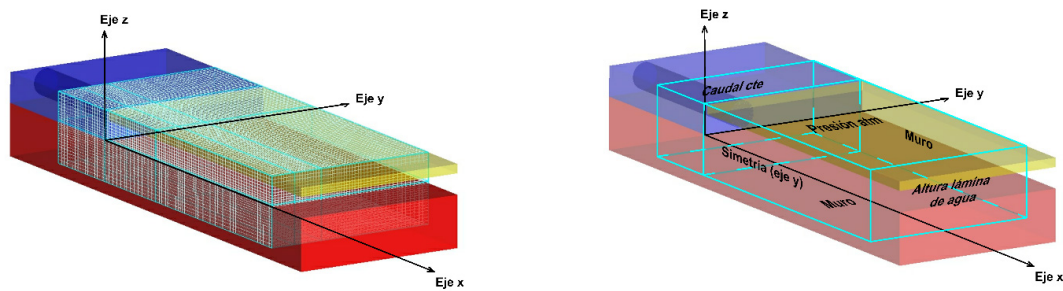


Figura 4 | Mallado del modelo 3D (izquierda) y sus respectivas condiciones de contorno (derecha).

Para estudiar la sensibilidad al mallado, una vez calibrado el modelo (cuyo proceso de ajuste se describe en el siguiente apartado) se han realizado varias simulaciones con distintos tamaños de celda (rango máximo y mínimo) en las tres dimensiones. Los criterios para determinar el mallado empleado han sido el tiempo de convergencia y los resultados de erosión, estableciendo como objetivo que el coste computacional sea lo más bajo posible y que dichos resultados sean similares a otra simulación con una geometría y mallado más definida. En base a esta prueba, el mallado adoptado finalmente consta de los dos bloques de malla y 11 planos de malla. En la Tabla 3 se muestran los límites en el espacio de los bloques de malla. Los rangos adoptados en el tamaño de celda óptimo en cada límite del espacio de dichos bloques de malla están comprendidos entre 0.01 m y 0.03 m, dando un total de 145 080 celdas.

Tabla 3 | Coordenadas de los límites de los bloques de malla en el espacio y número de celdas de cada uno de ellos.

Bloque de malla	x_{\min}	x_{\max}	y_{\min}	y_{\max}	z_{\min}	z_{\max}	Número de celdas
Bloque 1	-0.02	1.70	0.00	1.00	-0.23	0.173	115 440
Bloque 2	-0.50	-0.02	0.00	1.00	-0.23	0.173	29 640

El criterio de elección del tamaño mínimo y máximo de celda viene dado por la recomendación de dicho ratio que impone el software, el cual establece que el máximo tamaño de celda debería ser tres veces el tamaño menor de la celda (Flow-Science, 2016). En el apartado de Resultados y discusión se pueden ver los resultados que justifican el mallado final empleado.

f. Calibración del modelo numérico

En este apartado se describe el proceso de calibración secuencial seguido en este trabajo para ajustar progresivamente los parámetros introducidos en secciones anteriores, reproduciendo así la erosión de los resultados experimentales. Este proceso se ha elegido propiamente de acuerdo a la importancia que implican los modelos de turbulencia y transporte en la simulación. Tal y como se muestra la Figura 5, se comienza por seleccionar el modelo de turbulencia que mejor reproduce la realidad (RNG o $k-\omega$) considerando el resto de parámetros por defecto, para luego ajustar los parámetros del modelo elegido. Una vez ajustada

la turbulencia, se procede a seleccionar el modelo de transporte de sedimentos (Meyer, Peter & Müller, Nielsen y Van Rijn) y a calibrar los coeficientes del que mejor reproduzca la realidad. Dichos coeficientes son distintos para cada uno de los modelos de transporte de sedimentos (ver Flow-Science (2016) para más detalles). Posteriormente, se mejora la precisión numérica del modelo calibrado modificando el orden de precisión en la resolución de las ecuaciones de la cantidad de movimiento y ajustando la longitud de mezcla igual al 7% del diámetro de la ODT (Flow-Science, 2016). Finalmente, se hace la mencionada prueba de sensibilidad de malla. La nueva metodología mostrada en la Figura 5 es un intento por sistematizar la calibración de los modelos de erosión local, donde intervienen multitud de fenómenos físicos y los tiempos de simulación son tan elevados que no permiten la realización de un gran número de combinaciones.

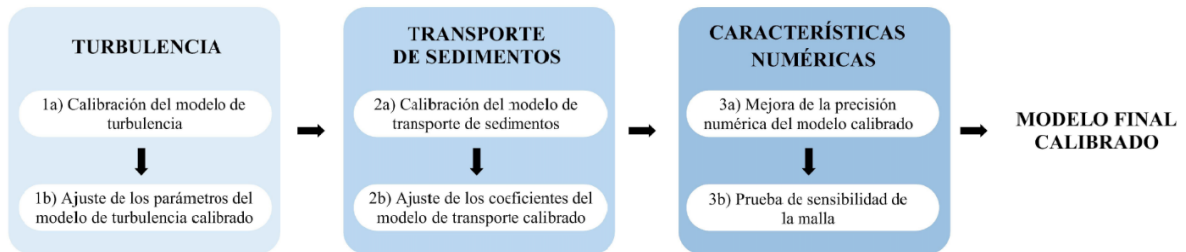


Figura 5 | Esquema secuencial de la calibración del modelo numérico 3D.

La selección de los mejores modelos y/o parámetros en las diferentes etapas se ha realizado según los resultados obtenidos en el perfil longitudinal a través de la tubería, eligiendo el mejor perfil en función de la media cuadrática (RMS, del inglés *Root Mean Square*) entre el modelo experimental y el modelo numérico, y en función de las principales variables del foso de erosión: $d_{s,max}$, $L_{s,max}$ (distancia a la que se produce $d_{s,max}$ desde el eje de la ODT a su salida), L_s (longitud total del foso de erosión desde el eje de la ODT a su salida), $d_{s,0}$ (erosión inicial a la salida del eje de la ODT).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primero se mostrarán los resultados de la calibración secuencial que justifican las características del modelo numérico definitivo, y posteriormente se analizarán los resultados de la erosión experimental frente a la obtenida numéricamente.

Resultados de la calibración y justificación del modelo numérico definitivo

De acuerdo con la secuencia de calibración descrita, en primer lugar, se ajusta el modelo de turbulencia. Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados del perfil longitudinal (a lo largo del eje de una de las tuberías) y transversal (perpendicular al eje de las tuberías justo a la salida) resultantes en ambos modelos (RNG o $k-\omega$) respecto a los resultados experimentales. En esta primera etapa de la calibración se ha considerado el modelo de transporte de Meyer, Peter & Müller (por defecto) según las recomendaciones de la literatura, teniendo en cuenta el efecto de la pendiente.

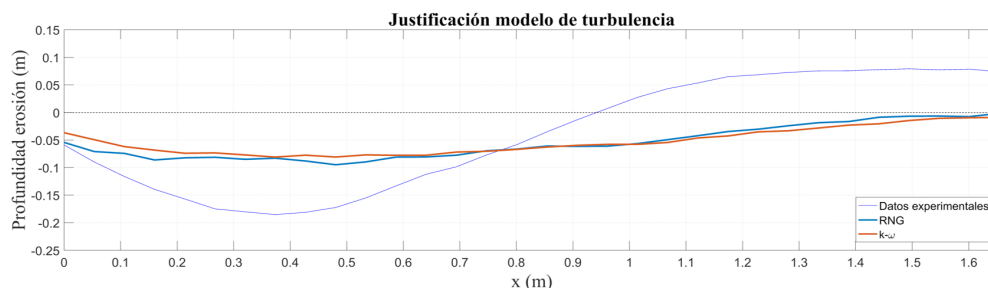


Figura 6 | Perfil longitudinal empleado para la elección del modelo de turbulencia

La Figura 6 muestra ligeras diferencias entre ambos modelos justo a la salida de la ODT, mientras que en el resto del perfil siguen la misma tendencia. El modelo RNG aproxima mejor la erosión justo a la salida de la tubería que el modelo $k-\omega$. La diferencia experimental-numérico del modelo RNG (RMS=0.0741) es mejor que el modelo $k-\omega$ (RMS=0.0806).

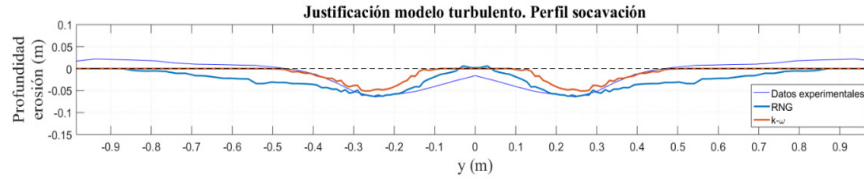


Figura 7 | Calibración del modelo de turbulencia. Perfil transversal.

En cuanto al perfil transversal (Figura 7), los dos modelos se aproximan bien a los resultados experimentales, sin embargo, hay una ligera diferencia respecto al área de socavación en el entorno de la salida del flujo, ya que el modelo RNG erosiona más que el modelo $k-\omega$. En base a estos resultados se ha optado por elegir el modelo RNG como modelo de cierre turbulento.

La Figura 8 muestra los resultados del ajuste de los parámetros intrínsecos de las ecuaciones por la que se rige el modelo RNG. Este ajuste se ha realizado cambiando los valores por defecto (Tabla 1) a un valor máximo y mínimo, recogidos en la Tabla 4, junto con la RMS de cada simulación. Se ha seguido utilizando el modelo de transporte de Meyer, Peter & Müller.

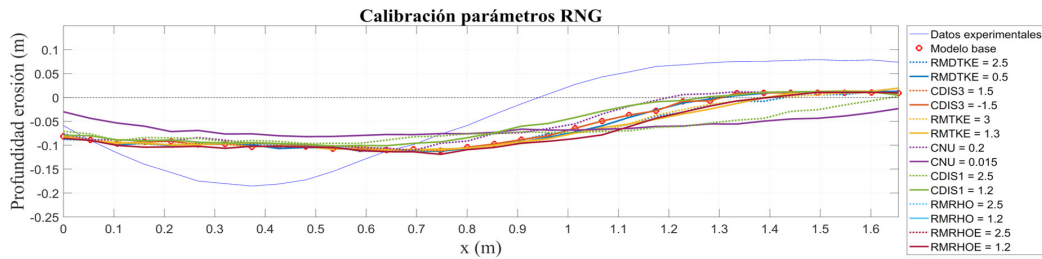


Figura 8 | Ajuste de los parámetros del modelo de turbulencia RNG.

De forma general, se puede decir que los resultados obtenidos tienen una tendencia similar a los experimentales, tanto en su forma como en los valores máximos de la erosión, excepto cuando se varía el parámetro CNU. Por otro lado, los parámetros RMRHO y RMRHOE no tienen influencia significativa en el foso de erosión, resultando sus soluciones idénticas. El parámetro que hace que el ajuste del perfil longitudinal mejore considerablemente, atendiendo a la RMS es CIDS1=1.2.

Tabla 4 | Media cuadrática de la calibración de los parámetros del modelo de turbulencia RNG respecto a los resultados experimentales.

Parámetro	RMS (m)	Parámetro	RMS (m)
Por defecto (modelo base)	0.0659	CDIS 1 = 2.5	0.0839
RMDTKE = 2.5	0.0716	CDIS 1 = 1.2	0.0607
RMDTKE = 0.5	0.0668	RMRHO = 2.5	0.0727
CDIS 3 = 1.5	0.0659	RMRHO = 1.2	0.0727
CDIS 3 = -1.5	0.0659	RMRHOE = 2.5	0.0727
RMTKE = 3	0.0713	RMRHOE = 1.2	0.0727
RMTKE = 1.3	0.0720		
CNU = 0.2	0.0617		
CNU = 0.015	0.0927		

Una vez finalizado el ajuste del modelo turbulento, se muestran los resultados que justifican el modelo de transporte de sedimentos, considerando o no el efecto de la pendiente. La Figura 9, y la Tabla 5 muestran los perfiles y las medias cuadráticas

del error asociadas a cada modelo numérico, respectivamente. La nomenclatura usada es M, para Meyer, Peter & Müller, N, para Nielsen y V, para Van Rijn. El efecto de la pendiente se ha indicado con 1, y cuando no se ha tenido en cuenta con 0.

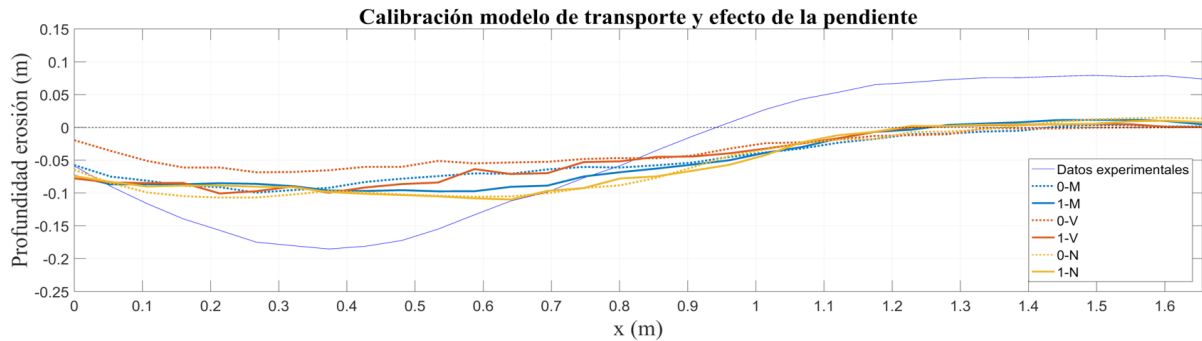


Figura 9 | Calibración del modelo de transporte de sedimentos y el efecto de la pendiente.

Según los resultados, todos los modelos de transporte de sedimentos se ajustan relativamente bien a los resultados experimentales excepto el 0-V, que muestra una clara subestimación de los valores de erosión. Según la media cuadrática, el modelo de Van Rijn es el que menos erosión produce, mientras que los dos restantes, los modelos de Meyer-Peter-Müller y Nielsen, tienen soluciones similares. Es por ello que, para la siguiente etapa de la calibración se ajustarán los coeficientes de los modelos de Nielsen sin el efecto de la pendiente y Meyer, Peter & Müller con el efecto de la pendiente.

Tabla 5 | Media cuadrática de la calibración del modelo de transporte y el efecto de la pendiente respecto a los resultados experimentales.

Modelo de transporte	0-M	1-M	0-V	1-V	0-N	1-N
RMS (m)	0.0671	0.0611	0.0769	0.0629	0.0587	0.0604

Para ajustar el coeficiente del modelo de transporte de Meyer, Peter & Müller ($\beta_{MPM,i}$, Ecuación 6) y de Nielsen ($\beta_{Nie,i}$, Ecuación 7) se han tomado valores 8, 13 y 18, y 6, 12 y 18, respectivamente (valor mínimo, medio y máximo). La Figura 10 muestra el perfil longitudinal de estas combinaciones. En todos los casos los resultados son similares. No obstante, de acuerdo a la Tabla 6, donde se muestran el valor máximo de la erosión, $d_{s,max}$, la distancia a la salida de la tubería a la que se produce, $L_{s,max}$, la longitud del foso de erosión, L_s , y la erosión justo a la salida del tubo ($x=0$), d_{s0} , el modelo 1-M_8 es el que aproxima mejor L_s , el modelo 0-N_6 aproxima mejor $L_{s,max}$, y el modelo 0-N_12 aproxima mejor $d_{s,max}$ y d_{s0} . Puesto que no es evidente cuál es el modelo que mejor representa las medidas del foso de erosión, la selección del mejor modelo se realizará una vez mejoradas las características numéricas del modelo (ajustando la longitud de mezcla principalmente).

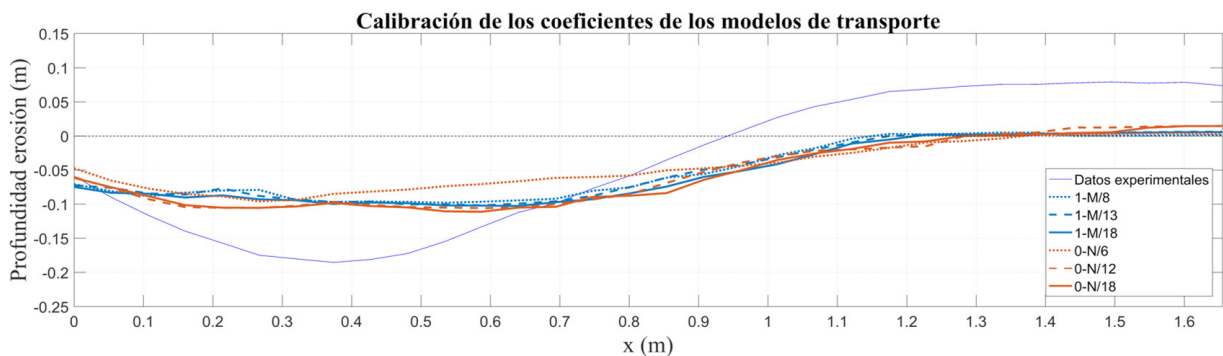
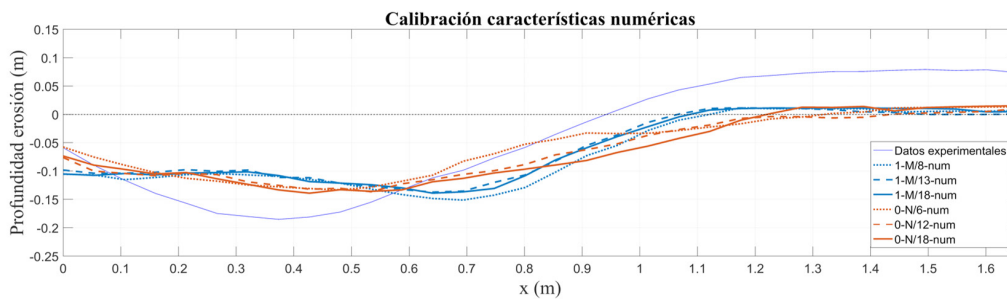


Figura 10 | Ajuste del coeficiente de los modelos de Meyer, Peter & Müller, y Nielsen.

Tabla 6 | Medidas del foso de erosión del ajuste de los coeficientes de los modelos de transporte.

	Experimental	1-M_8	1-M_13	1-M_18	0-N_6	0-N_12	0-N_18
$d_{s,max}$ (m)	-0.1852	-0.1002	-0.1026	-0.1027	-0.0972	-0.1151	-0.1125
$L_{s,max}$ (m)	0.3737	0.3300	0.5100	0.5500	0.3500	0.2500	0.2500
L_s (m)	0.9609	1.1300	1.1500	1.1800	1.3400	1.2600	1.2600
d_{s0} (m)	-0.0587	-0.0707	-0.0723	-0.0747	-0.0473	-0.0603	-0.0615

En la Figura 11 y en la Tabla 7 se muestran los resultados de los perfiles y de las medidas del foso de erosión (respectivamente) al variar la longitud de mezcla y el orden de precisión para diferentes coeficientes en sus formulaciones. Por tanto, la Figura 11 y la Tabla 7 son una versión revisada de la Figura 10 y la Tabla 6 introduciendo parámetros numéricos adicionales.

**Figura 11** | Calibración de las características numéricas.

De manera general se puede ver que los resultados mejoran al modificar las características numéricas (aumentar la longitud de mezcla). Según los perfiles, la máxima profundidad de erosión en el modelo de Meyer, Peter & Müller se ubica en torno a los 70 cm desde la salida de la ODT, mientras que en el de Nielsen se encuentra a los 50 cm. Según la Tabla 7, para el modelo de Meyer, Peter & Müller, los resultados mejoran al aumentar su coeficiente, mientras que con el modelo de Nielsen ocurre al contrario. El modelo que mejor se adapta al perfil longitudinal, considerando la variación en sus parámetros y en las características numéricas del modelo, es 0-N_6-num, es decir, el modelo de transporte de sedimentos de Nielsen sin considerar el efecto de la pendiente con un valor de su coeficiente $\beta_{Nie,i}$, y con la longitud de mezcla igual al 7% del diámetro de la tubería.

Tabla 7 | Medidas del foso de erosión de la calibración con la aplicación de las características numéricas.

	Experimental	1-M_8-num	1-M_13-num	1-M_18-num	0-N_6-num	0-N_12-num	0-N_18-num
$d_{s,max}$ (m)	-0.1852	-0.1511	-0.1398	-0.1400	-0.1334	-0.1365	-0.1394
$L_{s,max}$ (m)	0.3737	0.7100	0.6130	0.6340	0.4700	0.5300	0.4300
L_s (m)	0.9609	1.1000	1.0500	1.0800	1.3100	1.4200	1.2100
d_{s0} (m)	-0.0587	-0.1055	-0.0982	-0.1051	-0.0576	-0.0760	-0.0734

Finalmente, en la Figura 12 se muestra la última comprobación, orientada a evaluar la sensibilidad del modelo al tamaño de la malla. Para ello, se varía el rango de los tamaños de los bloques de malla y se analiza el efecto que esto supone en términos de calidad de los resultados y coste computacional. Esta prueba se ha realizado para un mallado más grueso (17,342 celdas; #1), y otro más fino (478,880 celdas; #3), en comparación con el que se había utilizado en las etapas anteriores (145,080 celdas; #2).

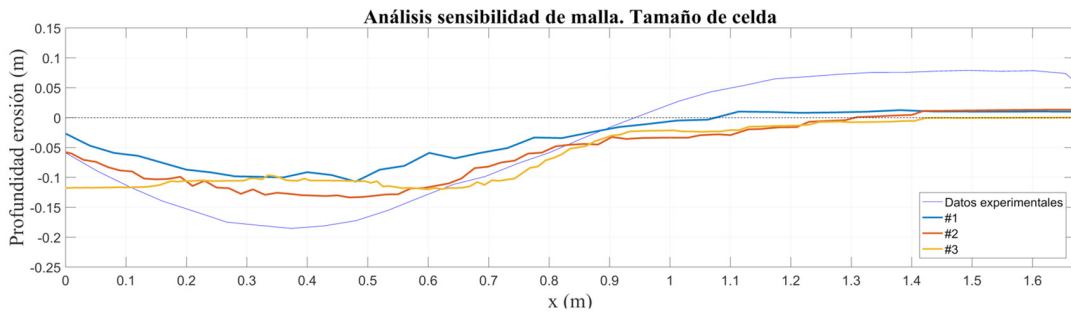


Figura 12 | Prueba de sensibilidad de malla.

Como se puede observar en la Figura 12, el mallado #2 es el que más se aproxima a los resultados experimentales dado que es el que se ha calibrado. Además, el tiempo computacional también es significativo, ya que con #1 el tiempo empleado es de una hora y 23 minutos, con #2 es de 15 horas y 51 minutos, y con #3, es de cuatro días, 18 horas y 14 minutos. Con ello, se considera que el mallado #2 es el que mejor se ajusta a la realidad experimental que se pretende simular, logrando un buen equilibrio entre la calidad de los resultados y el tiempo de cálculo. Hay que destacar que si se hubiera utilizado un mallado más fino desde el inicio del proceso secuencial, los parámetros de calibración hubieran cambiado y por consiguiente, también los resultados finales de la erosión, pudiendo ser mejores de lo que se ha conseguido. Por tanto, lo que se ha analizado es que una vez calibrado los coeficientes de los modelos de turbulencia y transporte de sedimentos con un mallado fijo, disminuir el tamaño de malla no asegura mejores resultados ya que habría que calibrar todo de nuevo.

Como conclusión, el modelo numérico 3D definitivo utiliza el modelo de turbulencia RNG con el coeficiente $CDIS1 = 1.2$ (dejando el resto de parámetros en sus valores por defecto), el modelo de transporte de Nielsen sin tener en cuenta el efecto de la pendiente y un coeficiente de cama de sedimento igual a 6, con un orden de precisión 3, y con la limitación de la longitud de mezcla igual al 7% del diámetro de la ODT (0.01071 m).

Resultados de la erosión: modelo físico vs. modelo numérico

A continuación, se compararán los resultados de la erosión obtenidos en el modelo numérico calibrado respecto al modelo físico. Para ello, se estudiará el foso de erosión, los perfiles longitudinal y transversal (socavación), y la progresión temporal de la erosión en un punto analizado. De manera general, en el foso de erosión se forman dos zonas bien diferenciadas: una zona de erosión, y tras ella, una zona de deposición. Los resultados numéricos alcanzados son buenos excepto en la simulación de la sedimentación, la cual se ha desarrollado de manera muy ligera con respecto a los resultados experimentales. En este sentido podrían desarrollarse estudios adicionales para ajustar la sedimentación, pero este trabajo se centra en el proceso de erosión ya que es el que tiene lugar más cerca del terraplén y el que puede terminar comprometiendo la estabilidad de la infraestructura. La forma geométrica que se deriva en planta es elíptica, con una distribución agregada y concentrada en el foso de erosión. Finalmente, el volumen total erosionado en los ensayos experimentales es de 0.075 m^3 , mientras que en la simulación numérica es de 0.1094 m^3 (ver Figura 13).

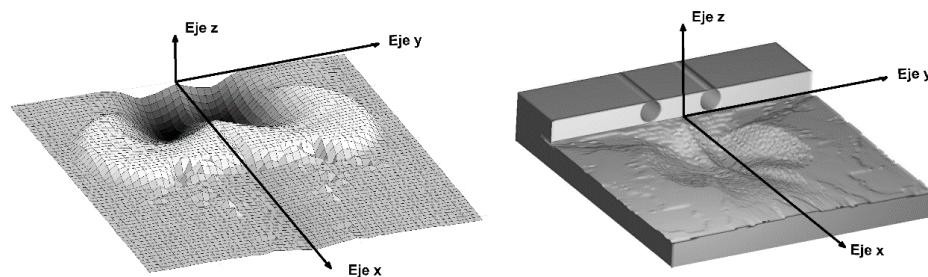


Figura 13 | Foso de erosión experimental (izquierda) y numérico (derecha).

En cuanto a los perfiles longitudinal y transversal (Figura 14), los resultados siguen la tendencia de la forma del perfil experimental, pero en algunos tramos, las magnitudes de la erosión difieren entre ellas. A pesar de ello, los ratios que se muestran en la Tabla 8 de las medidas del foso de erosión, tienen una buena aproximación en su conjunto, más aún dada la alta complejidad y el alto carácter no lineal del fenómeno en estudio.

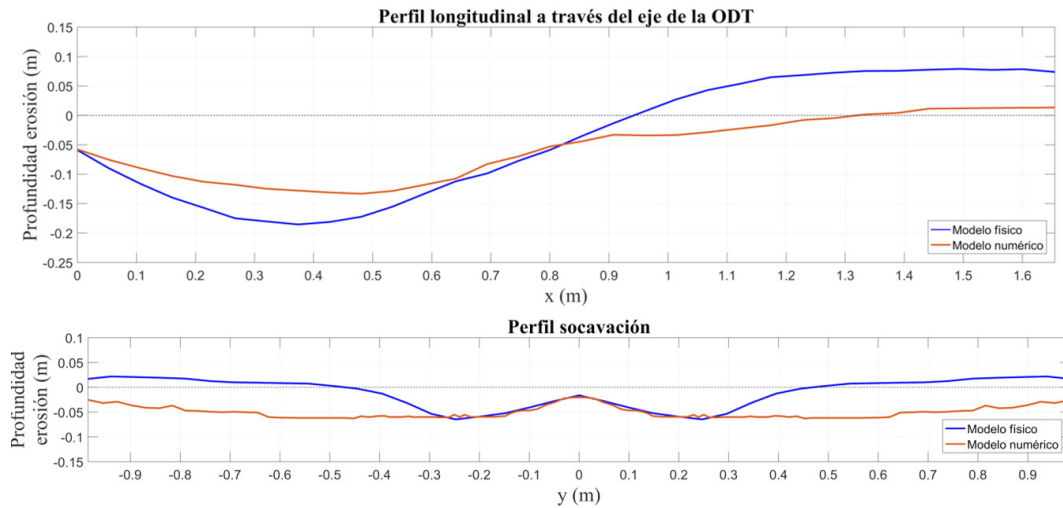


Figura 14 | Comparación del perfil longitudinal (arriba), y del perfil transversal (abajo).

En el perfil longitudinal, se puede observar que d_{s0} (erosión justo a la salida del tubo) es idéntica, sin embargo, hay una clara diferencia en la pendiente del perfil longitudinal en ese punto. En el resto del perfil, se puede ver que la estimación de la erosión es aceptable hasta los primeros 90 cm, ya que a partir de ahí se extiende la zona de sedimentación, donde existen mayores diferencias. En esos primeros 90 cm, es esencial tener en cuenta $L_{s,max}$, ya que la estabilidad de la estructura y la socavación dependen fuertemente de ella. De igual forma, también condiciona a L_s , puesto que ésta influye en el comportamiento del flujo y las direcciones predominantes en el foso. Por otra parte, en el perfil de socavación (transversal) los resultados son muy similares entre el modelo físico y el numérico en un dominio de 50 cm ($-25 \text{ cm} < y < 25 \text{ cm}$), zona más próxima a los tubos. No obstante, para el resto del dominio el modelo numérico establece una erosión en todo el ancho del canal (L_{s0}), que no se produce en el laboratorio. En el caso de analizar el área socavada (A_0), hay que prestar atención en las inmediaciones de la ODT, ya que los elementos que puedan ubicarse en su alrededor podrán verse afectados.

Tabla 8 | Valores y ratios de las medidas del foso de erosión entre los resultados experimentales y numéricos.

	$d_{s,max}$ (m)	$L_{s,max}$ (m)	L_s (m)	d_{s0} (m)	L_{s0} (m)	A_0 (m ²)
Valor experimental	0.1852	0.3737	0.9606	0.0587	0.8890	0.0346
Valor numérico	0.1334	0.4700	1.3100	0.0576	1.9700	0.0986
Ratio (experimental/numérico)	1.39	0.80	0.73	1.02	0.45	0.35

La Figura 15 muestra la progresión de la erosión a los 50 cm y a los 70 cm a la salida del eje de la ODT a lo largo de los 10 minutos que dura el ensayo. La progresión temporal de la erosión numérica aproxima bien los resultados para cortos tiempos, ya que según Abdelaziz *et al.* (2010) transcurridos los primeros instantes de formación del foso, los errores numéricos se ven amplificadas. Además, este tiempo es distinto para la erosión a los 50 cm (3 minutos), y para la erosión a los 70 cm (6 minutos). En relación con el comportamiento del flujo y el ancho del canal, para un tiempo de ocho minutos, sucede un incremento de la erosión debido a la inestabilización del foso (avalancha), el cual vuelve a aproximarse a los resultados experimentales. Teniendo en cuenta la forma de los gráficos, la erosión va incrementándose a lo largo del tiempo hasta alcanzar un estado asintótico debido a la estabilización del foso de erosión, valor que en ningún caso es alcanzado en un periodo de tiempo tan corto como el empleado en este estudio.

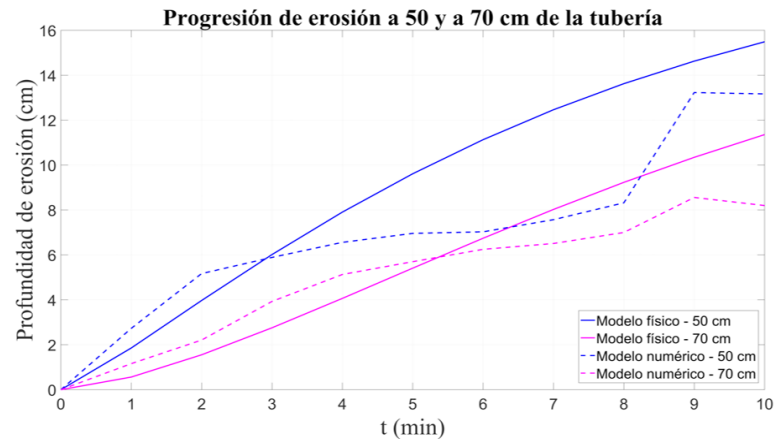


Figura 15 | Comparación de la progresión temporal a los 50 cm y a los 70 cm a la salida del eje de la ODT entre los resultados experimentales y numéricos.

CONCLUSIONES

De manera general, el análisis de la erosión local y el transporte de sedimentos en las proximidades de las ODT tiene gran potencial investigador por la repercusión social y económica que supondría el colapso de una infraestructura lineal. En este trabajo se ha realizado un modelo numérico 3D en FLOW-3D calibrado según los resultados experimentales de una ODT particular, para comprender mejor el proceso de erosión tridimensional que tiene lugar a la salida de una estructura de este tipo.

En lo que respecta al modelo numérico, cabe destacar la enorme importancia de realizar una calibración de todos los parámetros y/o coeficientes que intervengan en las ecuaciones de los modelos turbulentos y de transporte. Al final, estos modelos son empíricos y/o aproximados y como se ha podido observar, la modificación de un solo parámetro es suficiente para obtener resultados de erosión totalmente distintos. En este sentido, este trabajo prueba que la validación experimental es fundamental, y aunque los parámetros ajustados pueden ser orientativos para futuros trabajos, éstos cambiarán en otras configuraciones (geometría, nivel de obstrucción, etc.) y tipologías de problemas. La principal limitación de este necesario ajuste es el tiempo computacional para estudiar el efecto de todos los parámetros. En este sentido, las pruebas que se realicen para evaluar la sensibilidad de malla, son importantes para establecer un equilibrio entre el tiempo de cálculo y la calidad de los resultados obtenidos. En este caso, los tiempos de cálculo han sido del orden de 15 horas, tiempo aceptable para ver la respuesta del modelo frente a todos los parámetros influyentes en el problema. Por su parte, el procedimiento empleado en la calibración también es importante, ya que el propio orden utilizado para ir ajustando los modelos condiciona los resultados de la erosión.

En términos de comparación entre el modelo físico y numérico, los resultados obtenidos son esperanzadores, ya que ambas aproximaciones siguen la misma tendencia, a pesar de que existan algunas diferencias significativas en cuanto a la sedimentación. Sin embargo, la principal ventaja del modelo numérico es que permite obtener más resultados de la hidrodinámica en menor tiempo con respecto al modelo experimental. La realización de este tipo de modelos permite la simulación de diferentes alternativas de protección, que pueden repercutir en la reducción del riesgo de este tipo de estructuras a sufrir un colapso por erosión local a la salida de la ODT.

Así, se puede concluir que el modelo numérico desarrollado supone un apoyo fiable al modelo experimental construido, permitiendo obtener otros resultados, tales como velocidades, tensiones, etc. Además, dicho modelo sirve de base frente a futuras construcciones hidráulicas en donde se necesita un análisis profundo del problema que se va a abordar, facilitando así la comprensión del comportamiento hidrodinámico. Cabe destacar que hasta el momento sólo se ha abordado numéricamente un caso particular, por ello se deben realizar más análisis de este tipo en otras ODT para poder obtener conclusiones generales en términos de comportamiento frente a la erosión. Hay que subrayar que en este trabajo no se considera la existencia de elementos de protección (tipo aletas) ni obstrucciones provocadas por el arrastre de elementos sueltos en la cuenca que podrían taponar la estructura, pero será

necesario incluirlos en trabajos futuros para hacer los modelos más similares al estado real de las ODT. Por último, los resultados obtenidos animan a seguir investigando en la formulación para resolver la física aplicada numéricamente, fundamentalmente en los modelos de turbulencia y de transporte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad de España la financiación a través del proyecto BIA2014-53302-R.

REFERENCIAS

- Abdelaziz, S., Bui, M.D., Rutschmann, P. (2010). Numerical simulation of scour development due to submerged horizontal jet. *Proceedings of River Flow 2010*, September 8-10, Munich, Germany, 1597-1604.
- Abida, H., Townsend, R. (1991). Local scour downstream of box-culvert outlets. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117(3), 425-440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1991\)117:3\(425\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:3(425))
- Abt, S.R., Thompson, P.L., Lewis, T.M. (1996). Enhancement of the culvert outlet scour estimation equations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1523, 178-185. <https://doi.org/10.3141/1523-22>
- Bohan, J. (1970). *Erosion and riprap requirements at culvert and storm-drain outlets*. Technical report U.S Army Engineer Waterways Experiment (Hydraulic Laboratory Investigation), Vicksburg, Mississippi.
- Burkow, M., Griebel, M. (2016). A full three dimensional numerical simulation of the sediment transport and the scouring at a rectangular obstacle. *Computers and Fluids*, 125, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2015.10.014>
- Campos, J., González, J., Díaz, S., Galán, A. (2017). Metodología para la evaluación del riesgo y la priorización de inversiones en el mantenimiento de obras de drenaje transversal. *V Jornadas de Ingeniería del Agua*, 25-26 Octubre, A Coruña, España.
- Chatterjee, S.S., Ghosh, S.N., Chatterjee, M. (1994). Local scour due to submerged horizontal jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(8), 973-992. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1994\)120:8\(973\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1994)120:8(973))
- Day, R.A., Liriano, S.L., White, W.R. (2001). Effect of tailwater depth and model scale on scour at culvert outlets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water, Maritime Engineering*, 148(3), 189-198. <https://doi.org/10.1680/wame.2001.148.3.189>
- Flow-Science, Inc. (2016). *FLOW-3D User Manual, Release 11.2.0*, United States.
- Lim, S.Y. (1995). Scour below unsubmerged full flowing culvert outlets. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Water, Maritime and Energy*, 112, 136-149. School of Civil and Structural Engineering, Nanyang Technological University, Singapore. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1995.27659>
- Mehnfard, M.A., Dalfardi, S., Baghdadi, H., Seirfar, Z. (2015). Simulation of local scour caused by submerged horizontal jets with Flow-3D numerical model. *Desert*, 20(1), 47-55.
- Mendoza, C., Abt, S.R., Ruff, J.F. (1983). Headwall influence on scour at culvert outlets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(7), 1056-1060. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1983\)109:7\(1056\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1983)109:7(1056))
- Roads and Traffic Authority. (2010). *Culvert risk assessment guideline, version 3.02*. NSW, Australia.
- Sangdo, A., Hyeyun, K., Pierre, Y. (2015). Numerical modelling of local scour caused by submerged jets. *Maejo International Journal of Science and Technology*, 9(3), 328-343. <https://doi.org/10.14456/mijst.2015.25>

Sarathi, P., Faruque, M.A.A., Balachandar, R. (2008). Influence of tailwater depth, sediment size and densimetric Froude number on scour by submerged square wall jets. *Journal of Hydraulic Research*, 46(2), 158-175. <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521853>

Sorourian, S., Keshavarzi, A., Ball, J., Samali, B. (2014). Blockage effects on scouring downstream of box culverts under unsteady flow. *Australian Journal of Water Resources*, 18(2), 180-190. <https://doi.org/10.1080/13241583.2014.11465449>

Zhang, Q., Zhou, X-L., Wang, J-H. (2017). Numerical investigation of local scour around three adjacent piles with different arrangements under current. *Ocean Engineering*, 142, 625-638. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.07.045>