

MODELAMIENTO NUMÉRICO BIDIMENSIONAL DE UN FLUJO BIFÁSICO: CASO CANAL CON PLATAFORMA DE DEPOSICIÓN

Leonardo Castillo N.¹ y Samuel Quisca A.²

¹Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.

²Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima-Perú.

E-mail: leonardocastillo@uni.edu.pe, squisca@gmail.com

Introducción

El Perú no es ajeno a los flujos de huaycos (terminología peruana que significa mudflow, debris flow, flujos de lodo o barro) y un ejemplo de ello son los sucesos del verano de 2017 donde se desencadenó una serie de activaciones de quebradas que por décadas permanecían secas y produjeron flujos que afectaron a ciudades principales como Lima, Trujillo, Piura, entre otros. Este denominado "Niño Costero" afectó a nivel nacional alrededor de 12,000 viviendas en 711 distritos, según fuente del Centro de Operaciones de Emergencias Nacional (COEN). Un gran porcentaje de los peligros registrados fueron huaycos en su mayoría e inundaciones.

Los recientes avances en el estudio y modelamiento de los flujos hiperconcentrados, particularmente en los flujos de huaycos, permiten dejar de lado los métodos aplicables de flujos de agua con baja concentración de sólidos, y efectuar un análisis más consistente y confiable en la estimación de los parámetros de flujos hiperconcentrados para el diseño de medidas de protección. En este contexto, en base a resultados experimentales de laboratorio del explayamiento en un cono de deyección (plataforma) hace aplicable el desarrollo de modelos numéricos referidos a flujos hiperconcentrados que constituya una herramienta computacional para estimar con mayor precisión la vulnerabilidad y el riesgo que involucra el potencial peligro de la ocurrencia de un huayco en la deposición.

Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones de Saint-Venant describen el flujo bidimensional no estacionario promediado verticalmente. Dichas ecuaciones representan los principios de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, estando obtenidas a partir de las simplificaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes (Chaudhry, 1993).

En términos de las variables fundamentales del flujo h , u y v , las ecuaciones de Saint-Venant en forma conservativa pueden ser escritas vectorialmente como sigue:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}_y}{\partial y} + \mathbf{S} = 0 \quad [1]$$

donde:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ uh \\ vh \end{bmatrix} \quad [2]$$

$$\mathbf{E}_x = \begin{bmatrix} uh \\ u^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ uvh \end{bmatrix} \quad [3]$$

$$\mathbf{F}_y = \begin{bmatrix} vh \\ uvh \\ v^2h + \frac{1}{2}gh^2 \end{bmatrix} \quad [4]$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ -gh(S_{ox} - S_{fx}) \\ -gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad [5]$$

en las que t es el tiempo; u y v son las componentes del vector velocidad del flujo en las direcciones x e y (direcciones longitudinal y transversal); h es la profundidad del agua medida verticalmente; g es la aceleración de la gravedad; S_{ox} y S_{oy} son las pendientes de fondo en las direcciones x e y ; S_{fx} y S_{fy} son las pendientes de fricción en las direcciones x e y , x e y son las variables del sistema coordenado. E_x y F_y son los denominados vectores de flujo; \mathbf{U} es el vector de las variables dependientes y \mathbf{S} es el vector fuente. Las pendientes de fricción S_{fx} y S_{fy} pueden ser calculadas usando las fórmulas para régimen estacionario en el caso de fluidos newtonianos: Ecuación de Manning.

Sin embargo, Quisca (1995) dentro de su investigación doctoral sobre pruebas experimentales del proceso de desarrollo del flujo aplicado para agua y mezclas bifásicas de alta viscosidad, propone la siguiente ecuación para la resistencia al flujo hiperconcentrado. Considera una alta influencia de la resistencia por fricción al terreno y la viscosidad propia de la mezcla.

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{C_o^2 h^{1.33}} + \frac{3\alpha\mu u}{\gamma_m h^2} \quad [6]$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{C_o^2 h^{1.33}} + \frac{3\alpha\mu v}{\gamma_m h^2} \quad [7]$$

Donde: μ es la viscosidad dinámica, γ_m es el peso específico de la mezcla bifásica, α corresponde a una constante de resultados experimentales, n =coeficiente de rugosidad de Manning y C_o =factor de corrección de unidades ($C_o=1$ en unidades SI y 1.49 en Unidades Inglesas).

Técnica numérica aplicada

El método de MacCormack es un esquema explícito en diferencias finitas. Consiste en una secuencia de predicción-corrección de dos pasos (Chaudhry, 1993). Dicho método muestra ecuaciones en diferencias finitas que aproximan las ecuaciones de Saint-Venant para régimen no estacionario promediadas verticalmente.

En el tratamiento de los bordes del dominio se consideran los contornos sólidos con propiedades de reflexión. El procedimiento consiste en generar nodos ficticios en la pared sólida que son reemplazados por puntos del interior inmediato. El signo de la componente normal de velocidad es cambiado y representado en el nodo ficticio.

La estabilidad de un modelo numérico puede ser analizada comprobando si un error crece o decrece a medida que el proceso resolutivo avanza. La estabilidad puede ser estudiada despreciando o linealizando los términos no lineales, (Chaudhry, 1993). Una fórmula empleada en los criterios de estabilidad de métodos numéricos es la de Courant.

Se incorpora un tratamiento de viscosidad artificial con la finalidad de disminuir variación de niveles *y/o shock capturing*.

Todo el algoritmo completo se encuentra en entorno de MATLAB bajo un programa computacional denominado por los autores MUDCP2D.

Validación del modelo

Una vez constituido las ecuaciones numéricas y procesadas en un lenguaje de programación MATLAB, debemos contrastar los resultados con datos experimentales. En nuestro caso, emplearemos los resultados de la tesis doctoral Quisca (1995) para una mezcla bifásica. Emplearemos las dimensiones del canal experimental y la pendiente, así como el ajuste del parámetro adimensional de la rugosidad “n” de Manning. Para nuestro caso, el valor de “n” se aproxima a 0.03 en la dirección X y a 0.09 en la dirección Y. En la Tabla 1 se muestra todos los parámetros empleados del canal experimental con sus respectivos valores numéricos.

Tabla 1.- Dimensiones del canal y especificaciones.

Variable	Valor numérico	Descripción
$\Delta x, \Delta y$	0.025 m	Tamaño de la celda
Lm	0.80 m	Longitud de la muestra
Hm	0.10 m	Altura de la muestra
Lch	7.20 m	Longitud del canal
Ach	0.10 m	Ancho del canal
Lpl	1.80 m	Longitud de la plataforma
Apl	1.60 m	Ancho de la plataforma
Sch	0.1475 m/m	Pendiente del canal
Spl	0	Pendiente de la plataforma
Nx	393	Número de nodos en la dirección X
Ny	65	Número de nodos en la dirección Y

Las salidas gráficas corresponden a un número total de pasos de tiempo de 797. El frente de onda bifásica en la zona de plataforma, donde alcanza un tirante de 0.025 m a una velocidad de 0.85 m/s. Adicionalmente, el perfil presenta una mayor longitud de recorrido y una acumulación de tirantes concentrados en el frente a comparación del perfil del flujo de agua. Por otro lado, para el tramo de canal, el tirante máximo es de 0.055 m con una velocidad de 1.4 m/s.

En la Figura 1 se observa el flujo bifásico en la plataforma (zona de deposición) para distintos pasos de tiempo (637, 660, 695 y 750). La onda es simétrica casi semicircular, tal cual se muestra en los resultados experimentales Quisca (1995). La longitud recorrida del flujo alcanza una distancia 0.40 m en la plataforma y el ancho del frente de onda varía de 0.2 a 0.8 m. Los resultados aplicando la ecuación para el flujo viscoso de Quisca (1995) se aproxima mejor a las gráficas del modelo numérico MUDCP2D.

Resultados de caso

Plantearemos distintas pendientes y viscosidades para el caso del flujo hiperconcentrado con la finalidad de evaluar la sensibilidad y poder concluir en las ventajas y desventajas del programa MUDCP2D propuesto sobre un canal de 4 m de ancho, longitud del canal de 200 m y longitud de muestra de 50 m con 4 m de altura inicial. El valor promedio de peso específico de la mezcla simulado es de orden de 17094 N/m³ para una concentración volumétrica de sedimentos de 45%.

Se observa de los resultados, para todos los escenarios propuestos que los tirantes máximos del flujo hiperconcentrado se dan en el tramo de canal en lugar de la zona de deposición. La reducción es de aproximadamente el 20% de tirante. Además, se tiene que las muestras viscosas (flujo hiperconcentrado) reducen la velocidad del flujo, aumentando el cuerpo del frente de onda. Se forma un lóbulo frontal en el

perfil donde en los casos reales se suma material granular lo que provoca un mayor impacto y arrastre.

A diferencia de los flujos de agua, las velocidades en la dirección Y se reducen en más del 50% respecto a la velocidad en la dirección X. Es menor la reducción de un flujo hiperconcentrado que un flujo de agua respecto a las velocidades en la dirección Y.

Gran parte de los perfiles de flujo hiperconcentrado, se alargan en casi todo el recorrido del canal, dejando una cola final donde se encuentran los mayores finos (por ejemplo, limos). Es decir, la onda no transita y pasa, sino deja un desarrollo de tirantes menores a todo lo largo. Ver Figura 2.

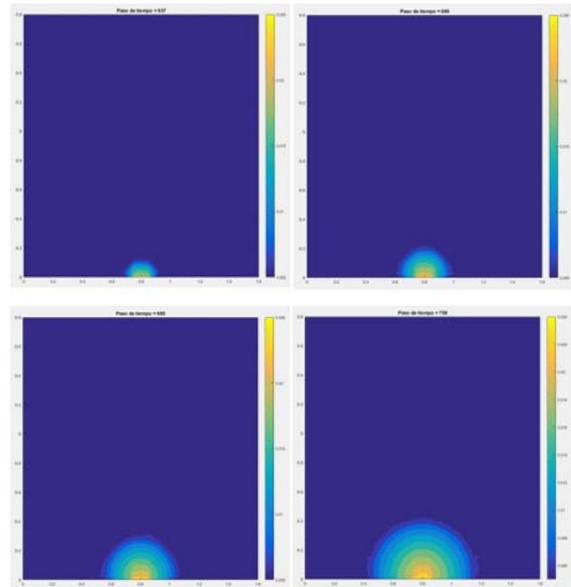


Figura 1.- Evolución temporal de la posición del frente de la onda bifásica sobre la plataforma de deposición para distintos pasos de tiempo.

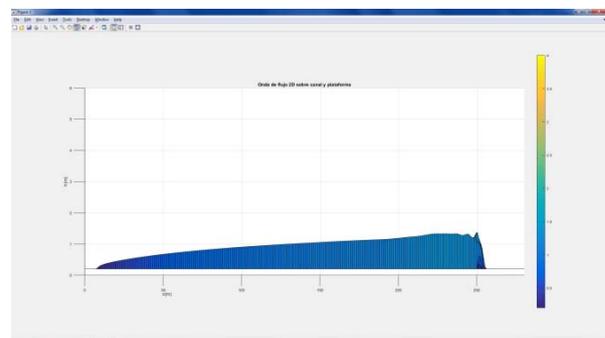


Figura 2.- Perfil de onda para mezcla bifásica ($\mu=150$ Pa.s).

Referencias bibliográficas

- Castro, O., Chanson H.** 2017. “Ritter’s dry-bed dam break flows: positive and negative wave dynamics”, *Environ Fluid Mech* 17: 665-694.
- Chaudhry, M. H.** 1993. “Open Channel Flow”, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Jameson, A., Schmidt, W., and Turkel, E.** 1981. “Numerical Solutions of Euler Equations by Finite Volume Methods using Runge-Kutta time-stepping Schemes”, *AIAA 14th Fluid and Plasma Dynamics Conference*, Palo Alto, California, AIAA-81-1259, 1981.
- O’Brien, J.S. y Julien, P.** 1988. “Laboratory Analysis of Mudflow Properties”, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, 877-887.
- Quisca S.** 1995. “Modelos numéricos del flujo de una avalancha de barros y escombros”, Tesis doctoral, Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Hidráulica, Mérida, Venezuela.